

La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis*, *En busca de la doble hélice*, *En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

La Tierra en movimiento

J. Gribbin

53





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca Científica Salvat









La Tierra en movimiento

Biblioteca
Científica
Salvat

La Tierra en movimiento

John Gribbin

SALVAT

Versión española de la obra original en inglés *Our Changing Planet,* de John Gribbin

Traducción: Miquel Canals
Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)
ISBN: 84-345-8933-8 (Volumen 53)
Depósito Legal: B-20180-1994
Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona
Impresa por Printer, i.g.s.a., Julio 1994
Printed in Spain

ÍNDICE

Para Benjamín,
que trata de ser fuerte

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha avanzado mucho en el concepto de "Planeta Tierra", con unos recursos limitados y una delgada capa de atmósfera y océanos: la biosfera. La situación empieza a ser preocupante porque las limitadas dimensiones de la biosfera la hacen vulnerable a la contaminación y porque un consumo indiscriminado puede provocar el agotamiento de los ya escasos recursos naturales. Todo ello puede acarrear el fin de nuestra sociedad. Pero el hombre y sus obras no son excesivamente importantes para el planeta Tierra, el cual ha estado sometido a continuos cambios a lo largo de miles de millones de años. Las fuerzas responsables de que la Tierra sea tal y como hoy en día se conoce aún están en acción, cambiando incesantemente la faz de la Tierra y la naturaleza de la biosfera de la cual depende el hombre para subsistir.

Los seres vivientes necesitan aire, agua, vientos, océanos y tierras y han ido evolucionando para adaptarse a la particular ordenación de las propiedades físicas del planeta Tierra. Pero todos estos elementos no son permanentes, sino que contienen en sí mismos las semillas de su propia destrucción o alteración. Los terremotos, las edades de hielo, el avance y el retroceso de los desiertos, la formación de montañas y la abertura de océanos, son procesos naturales que caracterizan a nuestro planeta en movimiento. Y en todos los casos existe la posibilidad de que se produzcan situaciones desastrosas para el hombre.

Sin embargo, hay otra manera de enfocar las cosas. Conociendo las causas de estos cambios, se puede comprender mejor cómo funciona nuestro planeta. Podemos determinar, por ejemplo, en qué regiones del mundo existen las mayores probabilidades de hallar reservas de petróleo, carbón o metales aún no explotadas; además, el correcto estudio de los procesos que generan los terremotos permitirá resguardarse de sus peores efectos.

Esta nueva concepción de la Tierra se ha hecho posible en los últimos años fundamentalmente gracias al advenimiento de la moderna teoría de la tectónica de placas, la cual explica de qué manera se desplazan los continentes. Pero estas ideas geofísicas no deben ser consideradas como un hecho aislado sino que, para mejorar nuestra visión de la realidad, deben ser contrastadas con las ideas procedentes de otras disciplinas, como la meteorología y la oceanografía, por ejemplo. Sin embargo, la panorámica mejor del significado (o, mejor dicho, insignificancia) de nuestro planeta en el espacio nos la proporciona una disciplina científica cuya aplicación al estudio de la Tierra no suele tomarse en consideración: la Astronomía. Hace ya mucho tiempo que los astrónomos se han dado cuenta de las reducidas dimensiones del planeta Tierra, tanto en el espacio como en el tiempo, y en general sus estudios sobre el sistema planetario pueden ser aplicados fructíferamente al caso especial representado por el planeta en que vivimos. La historia de la Tierra en movimiento empezó hace más de 5.000 millones de años, cuando se formó el Sistema Solar a partir de una nube de polvo y gas en el espacio interestelar. Las modernas teorías astronómicas muestran lo ocurrido en el principio y delimitan, a grandes rasgos, la evolución de nuestro propio planeta a partir de aquel momento.

En cierto modo, el estudio de nuestro planeta y de su evolución geofísica no deja de ser una rama de la astronomía planetaria. Los geofísicos pueden aprender mucho acerca de la naturaleza del planeta Tierra comparando sus datos con las informaciones suministradas por las naves espaciales no tripuladas que han visitado otros planetas. Recíprocamente, los astrónomos planetarios pueden interpretar mejor sus datos gracias a los modernos conocimientos acerca de la estructura y el comportamiento de la Tierra. Pero tanto si se incluye dentro de la astronomía como dentro de la geofísica, la historia de la Tierra en movimiento sigue siendo la misma. Dicha historia tiene una importancia crucial hoy en día, ya que por primera vez en la historia de la humanidad, las modernas ciencias de la Tierra no sólo pueden decirnos que nuestros recursos son limitados, sino que pueden ayudarnos a determinar con bastante precisión hasta dónde se extienden estas limitaciones. Ésta es la misma diferencia que existe entre circular a toda velocidad por una autopista sabiendo que debe terminar en algún sitio, pero sin encontrar ningún indicador que lo advierta, y circular habiendo visto las primeras señales que indican cuántos kilómetros faltan para el final. En este libro se combina el trazado de la ruta con las señales de alarma, mostrando cuál es la parte del camino que ya ha recorrido la Tierra, examinando dónde se encuentra en estos momentos e intentando adivinar cuánto camino le queda por recorrer.

I. EN LOS COMIENZOS

Nuestra Tierra es uno de los nueve planetas que orbitan alrededor de una estrella vulgar, la cual, a su vez, gira alrededor del centro de una gran asociación de estrellas: nuestra galaxia. Por sí sola, esta galaxia no es nada excepcional dentro de la escala astronómica de las cosas, ya que en el Universo existen millones de ellas. Sin embargo, tiene una gran importancia para nosotros y para nuestro Sistema Solar porque en ella es donde vivimos. Actualmente, parece ser que la estructura de la galaxia ha influido de forma decisiva en la formación de nuestro Sistema Solar y también sobre los acontecimientos ocurridos en la Tierra a lo largo de los últimos centenares de millones de años.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene cerca de un billón de estrellas, la mayoría de las cuales se concentran en un disco aplanado de unos 100.000 años luz de anchura y de unos 2.000 años luz de espesor (un año luz es la distancia recorrida por la luz en un año, que viaja a una velocidad de 300.000 km/seg). Este pastel de estrellas se distribuye formando una espiral, bastante parecida a la galaxia M51 de la figura 1 y a otras muchas galaxias. Las estrellas individuales orbitan alrededor del centro de la galaxia bajo la influencia de la gravedad; pero la distribución espiralada parece ser más o menos fija, hecho de vital trascendencia para la existencia de nuestro Sistema Solar –y de la Tierra– tal como hoy en día se conoce.

Hace diez mil millones de años probablemente no existían estrellas en la galaxia, y lo único que había eran unas nubes de gas que flotaban en el espacio. A partir de ese momento, algunas partes de la nube original se condensaron para formar estrellas que se distribuyeron en grupos de tamaños muy diversos, desde los que contienen un número muy reducido, hasta los que están constituidos por grandes concentraciones de millones de estrellas. Pero la historia primitiva de la galaxia no tiene por qué interesarnos; nuestro Sistema Solar no se formó hasta que el modelo espiral no estuvo bien establecido; en este momento, la galaxia contenía tanto estrellas como nubes de polvo y gas que orbitaban alrededor del centro y que traspasaban repetidamente los brazos de la espiral. En este continuo paso a través de la espiral parece hallarse la clave de la existencia de la Tierra.

La velocidad del Sistema Solar hace que éste dé una vuelta a la galaxia cada 250 millones de años. Esto puede parecer mucho tiempo, pero significa, ni más ni menos, que nuestro Sol y su familia de planetas han dado veinte veces la vuelta a la galaxia desde que se formaron, hace 5.000 millones de años. Y antes de esto, la nube a partir de la cual se formó el Sistema Solar puede que hubiese estado describiendo la misma órbita durante centenares de millones de años.

Al igual que la galaxia M51 de la figura 1, la mayoría de galaxias en espiral tienen dos brazos claramente definidos que se enroscan alrededor del disco galáctico. Nuestra propia galaxia se parece enormemente a la M51. Los brazos de la espiral tienen un aspecto brillante porque contienen muchas estrellas jóvenes; sin embargo, en el borde interior de los brazos hay franjas oscuras de gas y polvo que constituyen el auténtico corazón del modelo espiral.

Según las modernas teorías, el modelo espiral es una onda de choque estacionaria. Cómo se ha formado es aún un misterio cuyo tratamiento queda fuera de la intención de este libro. Las franjas oscuras delimitan el frente de la onda de choque. Cuando una nube de gas y polvo que esté orbitando tranquilamente alrededor del centro de la galaxia llega a una



Fig. 1. La galaxia espiral M51 (Observatorios Hale).

de estas franjas oscuras, se ve sometida a violentas fuerzas que reducen su volumen. Para las nubes muy difusas, esto no tiene por qué tener unas consecuencias inmediatas muy graves. Pero cada vez que la nube cruza uno de los brazos de la espiral, se comprime un poco más (y hay que tener en cuenta que en cada órbita alrededor de la galaxia cruza dos veces uno de estos brazos).

En ocasiones, puede que la nube sufra algún cambio. Pero ello dependerá en gran medida de la densidad inicial de la nube y de la cantidad de materia que haya en ella. Puede ser comprimida hasta convertirse en un montón de fragmentos sueltos parecidos a una nube de cometas (ésta sería, por otro lado, una de las explicaciones de la formación de cometas). Por otro lado, la compresión de una nube muy grande

hasta el punto de que su propia gravedad provoque su rotura y total colapso podría dar lugar a la formación de un gran grupo de estrellas. Y a mitad de camino entre estos dos casos extremos se hallaría el caso de una nube más "normal" que, como consecuencia de la compresión irrecuperable que hubiese sufrido, se colapsase dando lugar a unas pocas estrellas y a algunos fragmentos sueltos. En este caso, las pocas estrellas resultantes se separarían rápidamente unas de otras debido a su continuo viaje alrededor de la galaxia, arrastrando cada una de ellas algunos de los fragmentos, que no serían otra cosa que planetas recién creados. Desde el momento en que se formó, el Sistema Solar ha continuado viajando alrededor de la galaxia cruzando los brazos de la espiral otras cuarenta o cincuenta veces. Esto ha tenido una gran influencia en los procesos acaecidos en la Tierra, tal y como se verá más adelante. Pero, por el momento, nuestra atención se fija en el interior del Sistema Solar y, más concretamente, en uno de sus planetas: la Tierra. ¿Cómo ha llegado la Tierra a su estado actual? ¿Y cómo se puede calcular la edad de la Tierra?

En la actualidad, la segunda pregunta, al menos, es bastante fácil de responder. Muchas rocas contienen elementos radiactivos en pequeñas cantidades que, fraccionados mediante la desintegración radiactiva, dan lugar a nuevos elementos con carácter estable. Además, cada elemento radiactivo tiene su propia tasa de fraccionamiento. Una determinada cantidad de uranio, por ejemplo, se fracciona de manera que la mitad de su masa (sea cual sea la cantidad inicial de uranio que se haya tomado) se transforma en nuevos elementos cada 4.500 millones de años. En el caso del uranio, el producto final de esta desintegración radiactiva es el plomo. Cuando una roca se forma, quedan atrapados en ella una cierta cantidad de uranio y de otros elementos; midiendo proporciones relativas de uranio y de plomo que contiene actualmente esa roca, se podría conocer la edad de la roca y, a su vez, la cantidad de uranio que contenía originalmente.

Esta técnica también es válida en el caso de otros elementos radiactivos, lo que ha permitido averiguar que las rocas más antiguas de la Tierra tienen edades algo inferiores a los 4.000 millones de años. Pero la Luna y algunos meteoritos tienen edades superiores a los 4.500 millones de años; y los cálculos más afinados parecen indicar que la edad del Sistema Solar –y, por tanto, de la Tierra– es de, aproximadamente, 5.000 millones de años.

Para saber qué era la Tierra antes de que estuviese formada como tal se necesitan los esfuerzos combinados de geólogos, geoquímicos, geofísicos, astrónomos y biólogos. La primera conclusión extraída de la utilización conjunta de todas estas disciplinas es que la atmósfera actual de la Tierra es muy distinta de la atmósfera que poseía en un principio. Los llamados gases nobles (especialmente el helio) son mucho menos abundantes en la Tierra que en los espacios interestelares, en el Sol o en las estrellas. Parece bastante evidente que los procesos asociados con la formación de la Tierra provocaron el escape de estos gases hacia los espacios siderales cuya consecuencia fue la formación de una atmósfera secundaria.

¿Cuándo empezó a formarse la atmósfera actual? Es muy difícil dar una fecha precisa, pero el registro geológico demuestra que las rocas originadas por los procesos de sedimentación se formaron hace al menos 3.000 millones de años; eso quiere decir que en ese momento ya existían una atmósfera y unos océanos (una hidrosfera). Por otro lado, todos los indicios señalan que, en ese momento, no existía oxígeno libre en la atmósfera, y que éste no apareció hasta unos 1.200 millones de años después. Pero, entonces, hace unos 1.800 millones de años, se produjo un importante cambio en la naturaleza de la atmósfera terrestre.

Al parecer, la atmósfera primitiva estaba compuesta fundamentalmente por agua, dióxido y monóxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, cloro y azufre. Éstos son precisamente los mismos gases que liberan los volcanes y las fuentes termales y, según los datos más fidedignos, este mismo tipo de gases se liberaron cuando las capas exteriores fueron calentadas por algún hecho ocurrido en esas épocas tan remotas. Una de

las posibilidades es que la Luna fuese capturada por la Tierra hace unos 3.500 millones de años y que, como consecuencia de la fricción mareal derivada, las rocas se fundiesen dando lugar a la aparición de una atmósfera. Existen otras posibilidades, pero esta teoría es quizá una de las más plausibles y atractivas.

Sea cual fuere la causa del calentamiento, lo cierto es que la atmósfera se formó. Se han hallado microfósiles en rocas cuya edad es superior a los 3.000 millones de años, hecho que prueba que la vida surgió mucho antes de que hubiese oxígeno libre en la atmósfera. Además, el oxígeno sólo se incorporó a la atmósfera a través de la acción de los seres vivientes.

Lo que sigue a continuación es una larga y fascinante aventura. En las rocas de una antigüedad entre 1.800 y 3.200 millones de años hay muchas formaciones, denominadas "Banded Iron Formation" –B.I.F. ("Formaciones de Hierro Bandeado")–, que contienen hierro. Al parecer, los primeros organismos (no es demasiado apropiado llamarles "primitivos") utilizaban los iones ferrosos para absorber el oxígeno que se producía mediante la fotosíntesis. Antes de la aparición de las enzimas, que en las modernas formas de vida realizan el papel de intermediarios en cuanto a la utilización del oxígeno, este oxígeno habría sido peligroso para cualquier forma de vida. Por eso, se empleaban los iones ferrosos para neutralizarlo; el resultado fue la formación de las menas ferruginosas de las B.I.F.

Posteriormente, hace unos 1.800 millones de años, las B.I.F. dejaron de formarse y, en su lugar, comenzaron a depositarse los "red beds" ("capas rojas"), estratos teñidos con óxido férrico. La conclusión es muy clara: algunos organismos como las algas habían desarrollado las enzimas que necesitaban y habían aprendido a vivir en contacto con el oxígeno libre. Puesto que no existían organismos mayores que se las comiesen, estas algas primitivas pronto dominaron todos los océanos del mundo, liberando grandes cantidades de oxígeno que envenenaban a las viejas formas de vida; al mismo tiempo, se depositaron los primeros materiales que revelaban la acción corrosiva del oxígeno.

Fue aproximadamente en esta época, hace unos 1.800 millones de años, cuando la atmósfera empezó a parecerse a la actual. Antes de este gran cambio, como no había oxígeno en la atmósfera, tampoco existía la capa de ozono (la molécula triatómica del oxígeno) que en la actualidad nos protege de las radiaciones ultravioletas que, en esas épocas remotas, debían bombardear la superficie de la Tierra en grandes cantidades. Este bombardeo no permitiría el desarrollo de los organismos vivientes, ya que la radiación tiene efectos nocivos para las formas de vida que pueblan nuestro planeta. Pero, a medida que aumentaba la concentración de oxígeno, se fue desarrollando la capa de ozono gracias a la acción de la luz ultravioleta sobre la molécula biatómica normal de oxígeno. Cuando ya existía bastante ozono en la atmósfera, los rayos ultravioleta dejaron de alcanzar la superficie favoreciendo así la rápida colonización de seres vivientes en las luminosas aguas superficiales y la progresión de la fotosíntesis. Todo ello condujo al establecimiento de una atmósfera rica en oxígeno.

Estos hechos ocurrieron con inusitada rapidez. Presumiblemente, en respuesta a los cambios ambientales, se produjo una explosión de la actividad evolutiva que daría lugar a una gran diversidad de vida animal multicelular; y todo ello en tan sólo unos 100 millones de años. Para hacerse una idea de la celeridad, en términos geológicos, de este cambio, hay que tener en cuenta que la colonización de las tierras emergidas por las formas de vida salidas de los océanos primitivos, necesitó aproximadamente la misma cantidad de tiempo que la diversificación de los mamíferos durante el Cenozoico (véase la tabla de la página 15), ocurrida después de la extinción de los dinosaurios. Los dinosaurios tan sólo dominaron la vida sobre la Tierra durante unos 200 millones de años, iniciados a finales del Paleozoico.

La presencia de la vida sobre el planeta ha afectado en gran manera a la evolución de todo el sistema terrestre –o, al menos, a la evolución de sus capas más externas. Actualmen-

te, existe un equilibrio entre las partes vivas y las partes no vivas del sistema; este balance es el resultado de la realimentación entre una y otra parte a lo largo de miles de millones de años. Pero, naturalmente, la aparición de la vida dependió enteramente de las condiciones físicas dominantes en los primeros períodos del desarrollo de la Tierra.

Antes de que la vida pudiese empezar, tenía que existir algo que pudiese servir de alimento. En los meteoritos hay compuestos orgánicos muy similares a los que probablemente existieron en los primeros días de la Tierra. En realidad, estos compuestos podrían ser considerados más un combustible que un alimento; pero incluso hoy existen organismos que se nutren de ellos: como el queroseno utilizado en los aviones. Incluso sería posible utilizar estos compuestos para alimentar a la gente: actualmente se pueden sembrar levaduras en petróleo, dárselas a los animales de corral y comerse, finalmente, a dichos animales. Por supuesto, esta reversión de los hidrocarburos como uno de los eslabones de la cadena alimenticia, no tiene nada que ver con la crisis energética mundial. Si se pueden utilizar las reservas de petróleo para alimentar a la propia población humana, no deja de parecer un derroche utilizarlas como combustible en las centrales energéticas y en el transporte privado. Sin embargo, el conocimiento de los procesos que han moldeado a nuestro cambiante planeta puede aliviar algunos de los problemas planteados permitiendo, por ejemplo, la localización de reservas inexplotadas de combustibles (tal como se analizará en el próximo capítulo).

Lo cierto es que las primeras formas de vida surgidas en las etapas iniciales del desarrollo de la Tierra fueron capaces de aprovechar el tipo de alimentos que existían en ese momento. Es realmente sorprendente constatar que los descendientes remotos de aquellas antiguas formas de vida aún puedan comer los mismos tipos de alimentos, al menos indirectamente. Es evidente que, con tales condiciones ambientales y con tales materias primas la vida floreció por doquier. En este caso, las "condiciones idóneas" incluyen un suministro continuo de carbono y de energía necesarios para poner la máquina en movimiento. Analizando todo el Sistema Solar, nos daríamos cuenta de que los lugares con mayor número de probabilidades para que se den estas condiciones (aparte de la Tierra) no son, como podría pensarse, los planetas vecinos, Venus y Marte, sino los planetas gigantes, Júpiter y Saturno. Según las teorías más avanzadas, en estos planetas hay estratos cálidos debajo de las capas superiores atmosféricas congeladas. Las descargas eléctricas –producidas durante las tormentas en Júpiter– proporcionan la energía necesaria para que tenga lugar la síntesis de compuestos orgánicos, además de poseer mucho carbono en forma de gas metano.

Saber hasta qué punto la evolución ha podido arrancar a partir de este tipo de condiciones, todavía pertenece al terreno de la ciencia-ficción, pero tal vez las próximas cápsulas espaciales que visiten Júpiter y Saturno proporcionarán la respuesta. Sin embargo, es evidente que, dentro de la escala cósmica de las cosas, el hombre no es más que una criatura insignificante, por lo que es probable que existan en otros planetas dentro de nuestra galaxia, o incluso dentro de nuestro propio Sistema Solar, formas de vida tanto o más avanzadas que la nuestra. Además, persiste la impresión de que el hombre no es, por el momento, más que una anécdota dentro de la historia de su propio y diminuto planeta, la Tierra.

La historia del hombre sobre la Tierra es tan corta que sólo se puede entender su presencia en este planeta estudiándola, en primer lugar, desde una perspectiva temporal muy amplia que permita centrarse posteriormente en los acontecimientos más recientes. Las divisiones cronológicas de la geología clásica proporcionan la escala de tiempo dentro de la cual debe ser encuadrada la historia de la Tierra; desgraciadamente, los nombres de las distintas eras tienen poca relación con lo acaecido dentro de los intervalos de tiempo que describen e incluso, a veces, se prestan a confusión. Pero su uso está tan extendido que no parece que surja un nuevo sistema alternativo.

El período anterior a los 570 millones de años se denomina Precámbrico. Si se tiene en cuenta que la edad de la Tie-

rra es de unos 5.000 millones de años, resulta que el 90 % de la historia de la Tierra está comprendido dentro del concepto definido por esta palabra. Naturalmente, la razón es que cuanto más se retrocede en el tiempo, menos se sabe acerca de lo que ocurría en la Tierra; se conocen tan pocas cosas acerca del Precámbrico que sería realmente difícil dividirlo, atendiendo a criterios objetivos, en sub-eras.

Al menos el nombre de Precámbrico obedece a una lógica; tal como sugiere, el período siguiente, desde los 570 hasta los 500 millones de años Antes de la Actualidad (A.A.), se llama Cámbrico. Esta denominación es debida a que las rocas de este período fueron descubiertas en Gales, cuyo nombre romano era "Cambria". Se sabe muy poco acerca de las condiciones existentes en la Tierra en esa época. No había vida en tierra firme, pero todos los grupos principales de invertebrados ya habían evolucionado en el mar –especialmente, las medusas y las esponjas–. Las algas marinas ya existían en el Cámbrico, constituyendo el alimento de estas criaturas marinas. En tierra –un desierto estéril, sin vida– habían surgido muy pocas montañas, pero la actividad volcánica era considerable.

Durante el período Ordovícico, entre 500 y 435 millones de años A.A., se produjeron pocos cambios en tierra firme, pero en el mar aparecieron los primeros vertebrados. Sin embargo, en el período siguiente, el Silúrico (nombre de una tribu céltica), ya tuvo lugar un desarrollo significativo en tierra firme. Durante los 40 millones de años que duró este período, se formaron cadenas montañosas y, lo que es más importante para la historia del hombre, aparecieron las primeras plantas terrestres. Estas plantas eran muy raras si se comparan con las actuales y, por los restos hallados en Australia, da la impresión de que ni siquiera tenían hojas; pero suponen el primer paso en el largo proceso experimentado por las plantas y los animales consistente en el abandono de los confortables mares para colonizar progresivamente la tierra firme.

Después de las plantas, los primeros animales que abandonaron el mar lo hicieron durante el período Devónico

Tiempo antes de la actualidad (millones de años)	Era geológica	Periodo geológico	Época
		Cuaternario (3 millones)	Reciente (11.000) Pleistoceno (3 millones)
3			
	Cenozoico (aproximadamente el 1,5 % de la historia de la Tierra)	Terciario (67 millones)	Plioceno (4 millones) Mioceno (18 millones) Oligoceno (15 millones) Eoceno (20 millones) Paleoceno (10 millones)
70			
	Mesozoico (aproximadamente el 3 % de la historia de la Tierra)	Cretácico (71 millones) Jurásico (57 millones) Triásico (32 millones)	
230			
	Paleozoico (aproximadamente el 8 % de la historia de la Tierra)	Pérmico (55 millones) Carbonífero (65 millones) Devónico (50 millones) Silúrico (40 millones) Ordovícico (65 millones) Cámbrico (70 millones)	
Aproximadamente 570			
	Precámbrico (aproximadamente el 90 % de la historia de la Tierra)		

Los intervalos de tiempo entre paréntesis representan la duración de cada una de las subdivisiones. Los datos aquí expresados son aproximados, y cuanto más se retrocede en el tiempo, menos precisos son. Puede ocurrir que otros libros presenten edades ligeramente diferentes, pero el panorama global no varía por el hecho de que la datación de algunos periodos fluctúe unos pocos millones de años.

(nombre de la región inglesa homónima), el cual cubre el lapso de tiempo comprendido entre 395 y 345 millones de años A.A. Seguramente, encontraron que la tierra firme era un lugar mucho más agitado que aquel en el que habían permanecido durante millones de años, ya que se estarían formando montañas debido a la gran actividad volcánica existente en ese período. Pero quizás estos primitivos invertebrados (quilópodos, arañas, insectos ápteros y otros parecidos) no podían darse cuenta de cuán peligroso era el lugar que estaban intentando invadir.

En el Carbonífero (la Edad del Carbón), entre el final del Devónico y unos 280 millones de años A.A., aparecieron los reptiles, que fueron los primeros animales que se reprodujeron en tierra firme. Este período empieza a parecerse bastante a la estereotipada visión de terribles monstruos prehistóricos que habitaban en junglas pantanosas; situación que continuó a lo largo del Pérmico (nombre de una provincia rusa) y el Triásico (nombre de un sistema de montañas en Alemania), con lo que nos situamos en 193 millones de años A.A. En el Jurásico, que cubre los siguientes 57 millones de años, tuvo lugar un extraordinario desarrollo de los animales voladores, cuyos antecesores más directos, los dinosaurios, son los antepasados de las modernas aves. Sin embargo, en el período siguiente, el Cretácico (de la piedra llamada creta), se produjo un cambio dramático; los dinosaurios no voladores desaparecieron después de haber dominado la Tierra durante más de 200 millones de años. A finales del Cretácico, hace unos 65 millones de años, hicieron su aparición los mamíferos con placenta, cuyas crías se alimentan de la sangre de la madre hasta el momento del nacimiento; estos animales son los antepasados directos del hombre. Por lo tanto, todo el tiempo transcurrido entre la extinción de los dinosaurios y la aparición de nuestra moderna sociedad no es más que una cuarta parte del tiempo durante el cual los reptiles dominaron la Tierra.

A medida que nos acercamos hacia el momento presente, las divisiones del tiempo geológico van siendo más pequeñas,

reflejando el hecho real de que se sabe más acerca de los hechos recientes que acerca del pasado lejano. El período Terciario se extiende entre 65 y 3 millones de años A.A.; esos tres últimos millones de años pertenecen al denominado Cuaternario. Sin embargo, para situar al hombre dentro del contexto del desarrollo de la vida sobre la Tierra, no se debe incurrir en el error de contemplar a estos períodos como un todo sino que se deben examinar con detalle las distintas épocas geológicas que engloban. Hay que tener en cuenta, no obstante, que el Cuaternario y el Terciario juntos (constituyendo el llamado Cenozoico) sólo representan una cuarta parte del tiempo cubierto por la historia de los reptiles, y tan sólo el uno por ciento de la historia total de la Tierra.

Las dos épocas denominadas Eoceno y Paleoceno suelen ser consideradas como una sola unidad geológica que se extiende entre 65 y 38 millones de años A.A. En esa época, las plantas con flores dominaban el terreno y los árboles deciduos empezaron a extenderse. Dos grupos de mamíferos (las ballenas y las vacas marinas) abandonaron la tierra y se adaptaron a la vida en el mar, mientras que en tierra aparecían los antecesores de los elefantes, los caballos, los cocodrilos, las tortugas y, lo que es más importante para la evolución de la especie humana, los monos y los gibones.

El Oligoceno se remonta hasta 26 millones de años A.A., y a este período corresponde el inicio de la formación de los Alpes. Los geólogos han encontrado en las rocas de esa época los primeros restos de los antecesores inmediatos del hombre, los primitivos monos. En la época siguiente, el Mioceno (entre 26 y 7 millones de años A.A.), estos monos empezaron a propagarse, al igual que otros muchos mamíferos, incluidos los elefantes. En el Plioceno, entre 7 y 2 millones de años A.A., la gran diversidad de especies de mamíferos empezó a disminuir, pero los pre-homínidos continuaron desarrollándose y extendiéndose. Las glaciaciones supusieron la desaparición de muchas plantas y animales terrestres, y sólo sobrevivieron las plantas más resistentes (robles, espinos y sauces entre los árboles) y los animales más adaptables (espe-

cialmente el hombre primitivo). En ese momento, en el mar existía una diversidad de formas de vida mucho mayor que la actual.

La historia del hombre empezó hace no más de 26 millones de años y, hablando en sentido estricto, hace tan sólo dos millones de años. Por eso, a partir de esa fecha se deben contemplar los hechos a través de una escala de tiempo mucho más afinada.

A lo largo del período comprendido entre dos millones y 500.000 años A.A. hizo su aparición el famoso "hombre mono": los Australopithecos, el Hombre de Java y otros. Durante los siguientes 450.000 años, las diversas especies de "hombres mono" se desarrollaron dando lugar a las formas primitivas del hombre moderno y al Hombre de Neanderthal; el Hombre de Cro-Magnon sólo empezó a ser dominante hace unas pocas decenas de miles de años; el Cro-Magnon representa el inicio de la línea del *Homo sapiens*. El hombre moderno surgió hace unos diez mil años. La historia de la agricultura, de la cría de animales y el desarrollo de las formas de vida urbanas se produjeron en los últimos 10.000 años. La historia real del hombre tal como es hoy en día no representa más del 0,005 % del intervalo de tiempo durante el cual los reptiles dominaron el planeta; y esa dominación de más de 200 millones de años de duración representa menos del 4 % de la historia total del planeta.

Por eso, se puede afirmar que el hombre no es más que un recién llegado a la Tierra. Pero lo más sorprendente es que, incluso estando aquí desde hace tan poco tiempo, el hombre está a punto de inferir a la Tierra cicatrices que tardarán mucho en desaparecer, ya que el hombre está amenazando seriamente el equilibrio natural. Se ha dicho que la contaminación puede provocar cambios drásticos en las propiedades de la atmósfera; el riesgo nuclear es también muy elevado. En cualquier caso, los daños causados por el hombre podrían ser dramáticos si se comparan con los acontecimientos ocurridos durante los últimos 10.000 años, y podrían conducir quizás no a la desaparición del hombre pero sí a la de

otras muchas especies. Pero incluso aceptando que puedan llegar a convertirse en realidad, estas catastróficas previsiones no son nada comparadas con los acontecimientos producidos en la Tierra a lo largo de millones y de decenas de millones de años. La Tierra seguirá adelante, con o sin interferencia humana, y ya ha sentido sobre su propia piel cambios mucho más dramáticos que cualesquiera de los que el hombre pueda provocar, por accidente o por propia voluntad. ¿Qué significa una guerra nuclear para un planeta que ha visto crear y destruir continentes? ¿Y qué significado puede tener la desaparición de la especie humana comparado con el papel desempeñado por los reptiles en la historia de la Tierra? La aceptación de la verdadera insignificancia del hombre no es motivo para descorazonarse. Precisamente, debido a la ridiculez de los esfuerzos humanos comparados con las fuerzas de la naturaleza, es muy improbable que el hombre pueda provocar cambios terribles e irreversibles en el ambiente. Cambios, sí. Pero cambios a los que el hombre puede adaptarse, igual que lo hicieron sus antecesores, que, a diferencia de las ballenas, aprendieron a vivir bajo las mayores cotas de riesgo existentes en tierra firme en relación con los océanos. Y el tamaño y la dilatada historia de la Tierra aún permiten disfrutar de una gran reserva de recursos naturales. Se oye hablar continuamente de la escasez de petróleo y de metales, pero esto simplemente significa que son las reservas más accesibles y más fácilmente localizables las que se están agotando. Naturalmente, el ritmo acelerado de crecimiento de la curva de consumo de recursos no puede continuar durante mucho tiempo más. Las ventajas del crecimiento son un falso ídolo, ya que no tiene ningún sentido continuar ese crecimiento a partir del momento en que cada uno de nosotros pueda vivir y comer aceptablemente. Incluso si se mantuvieran los actuales niveles de consumo, las reservas de recursos vitales conocidas permitirían al hombre resistir un largo período, a pesar de que algunas de ellas puedan ser más difíciles de extraer que las que se están explotando actualmente (éste sería el caso de la explotación de las pizarras bituminosas en lugar de extraer las re-

servas de petróleo líquido). Pero ese hecho es un futuro muy lejano. El desarrollo de los modernos conocimientos acerca de la historia de la Tierra en movimiento permite deducir dos conclusiones: en primer lugar, que la pervivencia de la sociedad actual está asegurada mientras queden reservas inexplotadas de recursos y, en segundo lugar, que sólo se podrá racionalizar el consumo de los recursos cuando se conozca exactamente qué cantidad de ellos queda. Es cierto que los recursos de la Tierra son finitos; pero la geofísica y el nuevo estudio de la tectónica de placas permiten hacer un mejor uso de los recursos naturales.

Los intervalos de tiempo entre paréntesis representan la duración de cada una de las subdivisiones. Los datos aquí expuestos son aproximados, y cuanto más se retrocede en el tiempo, menos precisos son. Puede ocurrir que otros libros presenten edades ligeramente diferentes, pero el panorama global no varía por el hecho de que la datación de algunos períodos fluctúe unos pocos millones de años.

II. NUEVAS FUENTES DE RECURSOS PETROLÍFEROS Y MINERALES

Actualmente se concede una gran importancia a cualquier idea nueva que ayude a descubrir nuevos yacimientos de petróleo y gas o que permita racionalizar la utilización de las reservas existentes. Y si esa idea aporta nuevos conocimientos acerca de otros tipos de reservas, especialmente metales, es doblemente bienvenida. Hoy en día, las modernas teorías de la tectónica de placas y de la deriva continental constituyen un elemento clave para conseguir la utilización óptima de nuestras cada vez más escasas reservas. La aplicación práctica de los nuevos conocimientos acerca de la Tierra y de su dinámica interna se debe en gran medida a la "revolución geológica" ocurrida en los años 60. Gracias a esta "revolución", el concepto de deriva continental es actualmente una pieza clave, ampliamente aceptada, en nuestra concepción del funcionamiento de la Tierra a través de los tiempos geológicos. En los comienzos de la década de los 60, los geólogos que sostenían que los continentes se desplazaban eran considerados como bichos raros; pero, a finales de esa misma década cualquiera que dijese que los continentes no se movían era objeto de burla por la mayoría de los geofísicos. Más adelante veremos por qué ocurrió esa revolución, pero no es necesario conocer los entresijos de la historia para darse cuenta de la enorme importancia práctica que tiene el concepto de la deriva continental en la resolución de los problemas inherentes a la búsqueda de reservas minerales.

En nuestros días, uno de los problemas más acuciantes es la necesidad de hallar nuevas reservas de hidrocarburos. Es un problema de difícil solución debido, entre otras cosas, a que los hidrocarburos líquidos y gaseosos son capaces de migrar desplazándose entre los poros de las rocas y a que su composición química puede alterarse al cabo de algunos millones de años. Por estas razones, puede ocurrir que una reserva desaparezca por completo del lugar que ocupaba inicialmente. Sin embargo, la correcta aplicación de los conceptos de la deriva continental puede ayudar a localizar el emplazamiento actual de esos recursos.

Se cree que los yacimientos de hidrocarburos se han formado a partir de materia orgánica; el petróleo procede principalmente de los restos de proteínas animales, mientras que el gas (y algunos tipos de petróleo) procede de la descomposición de la materia vegetal. Los yacimientos de hidrocarburos son comunes en regiones deltaicas, fósiles o modernas, en las que los ríos acumulan grandes cantidades de restos orgánicos mezclados con partículas minerales. Los sedimentos deltaicos pueden ser recubiertos por otros tipos de materiales rocosos y verse progresivamente involucrados en los procesos de la deriva continental. La acción de las bacterias sobre los restos orgánicos continúa durante largos períodos de tiempo y, finalmente, da lugar a la formación de petróleo y gas. Ambos fluidos pueden evaporarse, desplazarse o, incluso, ser modificados aún más por las bacterias. Pero, en general, las mayores posibilidades de hallar nuevas reservas de hidrocarburos se basan en la localización de regiones en las que existieron antiguamente grandes deltas. La geofísica nos dice qué partes del mundo nunca han formado parte de esos grandes sistemas deltaicos; y ese tipo de información es muy importante, ya que así se puede concentrar el esfuerzo explorador en unas pocas regiones potencialmente interesantes en lugar de dispersarlo por todo el mundo.

Es muy fácil localizar los deltas actuales, pero éstos son demasiado jóvenes para que haya podido producirse en ellos el lento proceso de la conversión de los residuos orgánicos en

reservas de hidrocarburos. Los deltas antiguos son mucho más difíciles de localizar, ya que pueden encontrarse incluso en lo que hoy son cordilleras, como, por ejemplo, los dispersos campos petrolíferos de los Andes, en Sudamérica. Estos campos probablemente se formaron cuando América del Sur y África aún estaban unidas, es decir, antes de que se abriese el Atlántico Sur y los dos continentes empezasen a alejarse uno de otro. En aquellos tiempos, el río Amazonas iba de este a oeste y drenaba una única masa de tierra constituida por África y Sudamérica, acumulando el material transportado en lo que ahora es la costa occidental de América del Sur. Cuando los dos continentes se separaron, América del Sur se fue desplazando hacia el oeste, y ese movimiento ha sido en buena parte el responsable de la formación de los Andes en la "proa" del continente sudamericano; el efecto se parece bastante a los pliegues o arrugas que se producen en un mantel cuando se arrastra un objeto pesado por encima del mismo. El resultado de este proceso, en el caso de Sudamérica, es que actualmente el Amazonas fluye de oeste a este, o sea, desde los Andes hacia el Atlántico. Dentro de unos cuantos millones de años, la actual cuenca del Amazonas podría ser una rica fuente de petróleo y gas, pero actualmente esos combustibles deben ser buscados en la región montañosa andina, hacia la cual vertía el río antiguamente sus sedimentos.

Los cambios en la distribución de los continentes que tienen mayor importancia para la búsqueda de petróleo son los ocurridos durante los últimos 200 millones de años, a partir del momento en que empezaron a romperse los dos supercontinentes que existían por aquel entonces: Gondwana y Laurasia. Se conoce muy poco sobre la historia de la Tierra anterior a la rotura de Gondwana y Laurasia, y ello es debido a que el registro geológico de esas épocas es confuso a causa de las grandes convulsiones producidas cuando una generación ancestral de continentes colisionó formando los dos supercontinentes. Pero todos estos hechos antiquísimos tienen poca importancia para los trabajos de búsqueda de yacimientos productivos de petróleo y gas, ya que la mayor parte de

ellos se formaron hace solamente unas pocas decenas de millones de años. Durante este período se desarrollaron muchos deltas, en los que se acumularon importantes cantidades de materia orgánica. Además, en los mares someros se acumularon grandes cantidades de evaporitas, que son rocas impermeables para el petróleo y el gas; esas evaporitas sellaron los depósitos de hidrocarburos y los preservaron hasta hoy.

Más del 90 % de los campos de petróleo y gas conocidos están asociados con depósitos de evaporitas. Como su nombre sugiere, dichos depósitos se formaron por la evaporación de las aguas de las lagunas y los mares someros, debido al calor del Sol. Al evaporarse las aguas superficiales se formaban salmueras densas que se hundían hasta el fondo, acumulándose en él grandes espesores de las sales menos solubles en agua. El mismo tipo de proceso ocurre cuando se inundan regiones llanas ligeramente deprimidas que bordean los océanos; las aguas se evaporan y queda un depósito de evaporitas. Para que se formen depósitos de evaporitas volumétricamente enormes basta con que se vayan produciendo inundaciones ocasionales durante un período de unos cuantos millones de años de duración. Las mejores condiciones para la precipitación de evaporitas se dan en las latitudes bajas, en las que el calor del Sol es importante; y, además, la riqueza de la vida animal y vegetal propia de esas regiones favorece aún más la génesis de yacimientos de hidrocarburos. Por otro lado, las lagunas salobres suelen tener un elevado índice de salinidad que impide el desarrollo de animales superiores, como los peces, que tal vez se comerían los restos orgánicos; por eso, estas lagunas constituyen el hábitat ideal para los microorganismos (bacterias) encargados de transformar los residuos orgánicos en hidrocarburos. Esta visión relativamente simple de la formación de los depósitos de hidrocarburos se complica muy pronto debido a los procesos geofísicos. Por ejemplo, si la velocidad con que se forman los hidrocarburos se acelera sensiblemente debido a un aumento demasiado elevado de temperatura, puede producir la total evaporación del petróleo, por lo que la reserva habrá desaparecido.

El conocimiento de los procesos de la tectónica de placas sirve para identificar las regiones en las que han tenido lugar esos cambios de temperatura. Cuando dos continentes chocan, se forman montañas y se genera una gran cantidad de calor. El Himalaya se formó de este modo; cuando el subcontinente índico chocó contra Eurasia liberó una cantidad de calor tal, que disipó cualquier posible reserva de hidrocarburos. Pero, a veces, los continentes chocan oblicuamente, lo que permite que la cantidad de calor generada sea la ideal para acelerar el proceso de formación de reservas de petróleo y gas. Esta situación se da actualmente en el norte de Italia. África se está desplazando lentamente hacia Europa y, en términos geológicos, Italia es de hecho una prolongación de África y no una parte de Europa. Los Alpes (y más al oeste, los Pirineos) están siendo levantados debido al empuje ejercido por África, e Italia también se está levantando como consecuencia de su choque con Europa. Como resultado de este proceso, la formación de hidrocarburos a partir de materia orgánica se ha incrementado debido al calentamiento de las zonas septentrionales de Italia. Este hecho llevó a los geofísicos a predecir, en 1973, que la exploración petrolífera en esas regiones debería dar buenos resultados. Casi dos años después, se hallaron pequeños campos de petróleo en las regiones indicadas, lo cual constituyó la primera confirmación directa de la validez de esa nueva teoría acerca de la formación de las reservas de petróleo y gas. El mismo razonamiento explica la existencia de campos de gas en las vertientes de los Pirineos, aunque esos yacimientos ya eran conocidos en 1973, y quizás es más satisfactorio hacer primero la predicción y después verla confirmada, que limitarse a explicar un hecho ya conocido.

Sin embargo, es otro tipo de calentamiento el que permite explicar la localización de la mayoría de las reservas de hidrocarburos. La rotura de los continentes y el ensanchamiento de los océanos a medida que aquéllos se desplazan implica la creación de nueva corteza oceánica en algunos lugares y la destrucción de la misma en otros. Ambos extremos de la acti-

vidad tectónica global están relacionados con el calentamiento que se produce en las rocas cercanas y que genera una gran cantidad de calor, pero, naturalmente, el centro de los océanos es el último lugar en el que cabría esperar la existencia de depósitos orgánicos susceptibles de ser transformados, gracias a ese calor, en hidrocarburos. No obstante, el punto esencial de la deriva continental es que los continentes se desplazan; en consecuencia, al cabo de un cierto tiempo un continente puede llegar a cubrir parte de una dorsal oceánica en donde se produce la expansión. Cuando esto ocurre, o bien se detiene la expansión en la dorsal o bien el continente es empujado por la expansión. En ambas circunstancias, las rocas de los bloques continentales ricas en restos orgánicos se verán sometidas a un incremento de la temperatura que favorecerá la evolución de materia orgánica convirtiéndola finalmente en hidrocarburos.

El flujo calórico de esas regiones hará que los hidrocarburos se desplacen hasta alcanzar niveles más elevados, tal como ocurre en dos de las mayores reservas actualmente explotadas. En Siberia, hay muchos campos de gas altamente productivos situados sobre una rama muerta de la dorsal expansiva del Ártico; y alrededor de Los Ángeles, en California, muchos campos de petróleo están muy cerca de la región en que la dorsal del este del Pacífico entra en el Golfo de California, provocando una notable actividad sísmica en la Falla de San Andrés. Así, pues, las ideas de la tectónica de placas explican la presencia de reservas conocidas, pero ¿dónde podrían encontrarse, según estas modernas teorías, nuevos yacimientos de petróleo y gas?

El primer hecho a asumir es que esas posibles nuevas reservas podrían ser mucho menores de lo que se cree. Debido a la importancia de las regiones situadas en latitudes bajas en la formación de hidrocarburos, es probable que buena parte de las tierras situadas en el hemisferio Sur sólo contengan pequeñas cantidades de petróleo y gas ya que el supercontinente del sur, Gondwana, estuvo en latitudes bajas menos tiempo que el continente del norte, Laurasia. En definitiva, la tectónica de placas considera que alrededor de dos tercios de las reservas explotables se encuentran en el hemisferio Norte, el cual ya ha sido explorado intensamente mediante los métodos convencionales. En el hemisferio Sur, los lugares que ofrecen mejores perspectivas para hallar nuevas reservas se hallan en el Pacífico occidental y sudoccidental, y en el noroeste de Australia. En el hemisferio Norte, el Mar de Labrador, la plataforma de Terranova, el norte de Groenlandia y las islas árticas canadienses, son lugares en los que es posible hallar reservas inexplotadas de petróleo y gas, por lo que no cabe ninguna duda que la necesidad imperiosa de combustible conducirá a la explotación de esas regiones salvajes, como ocurre en el Mar del Norte y Alaska. Pero hay que tener en cuenta el hecho de que estas explotaciones supondrán el agotamiento de las últimas reservas de hidrocarburos, que, por lo tanto, dependerán de la correcta utilización que se haga de las mismas.

El Mar del Norte es un ejemplo claro del tipo de estructuras que actualmente están investigando los buscadores de petróleo. El buscador tiene en su mente un océano poco profundo, con una región costera llana y bien drenada por numerosos ríos que transportan restos orgánicos desde el interior del continente y, a poder ser, no muy alejado del Ecuador, para que así el calor del Sol favorezca la acumulación de evaporitas. El Mar del Norte se ajusta muy bien a este esquema; pero no es un descubrimiento original, ya que la búsqueda de depósitos petrolíferos bajo el mar se fomentó tras el hallazgo de yacimientos de gas en Holanda, poco antes de que los geofísicos tuviesen la información necesaria para predecir la existencia de ese petróleo. Desde finales de los años 60, las compañías petrolíferas han concentrado de tal manera sus esfuerzos en el Mar del Norte (y en Alaska, en donde se sabía positivamente que existían yacimientos de petróleo) que ninguna de ellas ha puesto en práctica los nuevos y poderosos conocimientos proporcionados por la moderna tectónica de placas. Pero las grandes compañías ya han analizado los nuevos conocimientos geofísicos y tienen sus propias ideas acerca de los

lugares en que pueden descubrirse los próximos grandes yacimientos de petróleo.

Volvamos al Mar del Norte. En él tuvo lugar un antiguo *rift*, o fosa tectónica, de la corteza terrestre que casi llegó a formar un auténtico océano. Cuando Europa y América del Norte empezaron a separarse surgieron varios *rifts*, de entre los cuales sólo uno se desarrolló plenamente hasta formar el Océano Atlántico; en este proceso, a Gran Bretaña le faltó muy poco para quedar convertida en una isla situada cerca de la costa de Nueva Escocia. Por eso, las nuevas reservas submarinas de petróleo deben buscarse en lugares en los que existieron antiguos *rifts* que no llegaron a formarse. La simple comparación de la geología de los márgenes opuestos de los océanos, por donde antes estaban unidos los continentes, proporciona otra interesante pista. Las cuencas salinas de la costa canadiense, por ejemplo, parecen indicar que en las primeras fases de desarrollo del Atlántico Norte existieron unas condiciones favorables a la formación de yacimientos petrolíferos; por tal razón, parece lógico buscar petróleo en las mismas latitudes, pero al otro lado del Atlántico, es decir, en la costa de Noruega.

El estudio de los *rifts* que no se desarrollaron plenamente –o rifts abortados–, que dieron lugar a verdaderos océanos, está dando resultados muy prometedores. Se encuentran en abundancia a ambos lados del Atlántico; cerca de Europa son importantes, aparte del Mar del Norte, el Mar de Irlanda (el cual pudo haber sido el centro de expansión del Atlántico si las cosas hubiesen transcurrido de una manera ligeramente diferente) y el Canal de la Mancha, que también reúne muchas de las características de los mares poco profundos potencialmente ricos en reservas de petróleo y gas. Más hacia el Norte también existen algunas posibilidades interesantes. Al norte y al este de la Península Escandinava se encuentra el Mar de Barents, una gran área marina con una historia tectónica parecida, al menos durante los últimos 100 millones de años, a la del Mar del Norte. Además, toda la región del norte de Noruega, al norte y al este del paso de las Spitzberg, es

una parte sumergida del continente eurasiático y la mayor plataforma continental del mundo. Esta región de corteza continental sumergida es mayor que África, e incluso el Mar de Bering (al este de Siberia) es, en su mayor parte, un continente sumergido. Ambas son regiones inhóspitas, pero en los dos casos se cumple el requisito de tratarse de regiones poco profundas en donde se acumulan los sedimentos procedentes del interior de los continentes y en las cuales han podido muy bien existir períodos de formación de depósitos evaporíticos que sellarían eventuales reservas de hidrocarburos. Los mapas centrados en el Polo Norte muestran estos aspectos de manera muy clara, y a su vez señalan las enormes dificultades que deberán ser superadas para explotar los petróleos nórdicos, suponiendo que en realidad existan. El Mar de Bering es prácticamente inabordable si se siguen los métodos de prospección actuales, ya que el límite sur de la banquisa se sitúa en los 70° N, alcanzando 75° N en el Mar de Barents, ya en el límite de los hielos flotantes. Las condiciones climáticas allí existentes logran que las perforaciones en el Mar del Norte resulten sencillas en comparación. Pero cuando las necesidades energéticas de la Tierra obliguen a intentar la perforación al norte del Círculo Polar puede que surjan dificultades. En esta zona hay un problema político latente que estallará cuando el mundo esté suficientemente desesperado por la búsqueda de nuevas fuentes de petróleo. El Mar de Barents es una región políticamente mal definida, lo cual puede retardar su explotación. Pero, en términos no estrictamente políticos, es al parecer la región que seguirá a Alaska y al Mar del Norte en la búsqueda de nuevos grandes yacimientos petrolíferos.

El Mar de Okhotsk, al norte del Japón y de las islas Kuriles, y limitado al este por Kamchatka, es una región políticamente no conflictiva y con unas perspectivas petrolíferas igualmente buenas desde el punto de vista geofísico. Se parece mucho al Mar del Norte (con Kamchatka ocupando el lugar de Gran Bretaña) y, además, se encuentra más o menos en la misma latitud, sólo que 150° más hacia el este.

La búsqueda imaginaria, utilizando los atlas de geografía, de regiones del mundo en las que pudiesen existir reservas de petróleo aún no descubiertas puede proporcionar horas de entretenimiento; pero no se debe olvidar que las grandes compañías petrolíferas están jugando exactamente al mismo juego, pero mucho más en serio, y que además cuentan con expertos geofísicos dedicados al tema. Pero, incluso dejando de lado la importancia a largo plazo del petróleo para el futuro de nuestra civilización, un conocimiento general de todos estos aspectos puede ser personalmente beneficioso para todo aquel que pretenda comprender a grandes rasgos la estructura y la evolución de la Tierra. Si se quiere invertir en el siempre arriesgado negocio del petróleo, debe hacerse en una compañía que esté explorando o perforando alguno de esos rifts abortados, y teniendo bien presente el ejemplo del Mar del Norte.

También los metales son una importante fuente de recursos. Uno de los descubrimientos más interesantes de los últimos años ha sido el hallazgo de nódulos ricos en níquel, cobalto y cobre, los cuales recubren el fondo oceánico en algunos lugares del mundo. Se ha hablado mucho acerca de las posibilidades de explotar estos nódulos de unos pocos centímetros de diámetro y que generalmente se encuentran a profundidades superiores a los 3.810 m; pero las dificultades con que tropieza esa posible explotación son enormes; no obstante, el simple hecho de que el proyecto haya sido tomado en serio muestra la imperiosa necesidad de aumentar la producción mundial de los metales citados. Los nódulos están compuestos fundamentalmente por hierro y manganeso (alrededor del 20 % de promedio), pero la extracción de los mismos para aprovechar estos dos metales no tiene interés puesto que en tierra firme aún hay grandes reservas minerales cuya riqueza en manganeso, e incluso en hierro, es mayor que la de los nódulos. Sin embargo, las concentraciones del 1 ó el 2 % de níquel y del 0,1 al 0,4 % de cobre y cobalto son suficientes para impulsar los importantes esfuerzos investigadores orientados hacia su explotación a gran escala. Pero ningún proyecto minero de esa índole (el cual sin duda se parecería más a una gigantesca operación de barrido que a una mina convencional) podría tener éxito si los mineros no conociesen exactamente dónde se encuentran los nódulos y cuál es la riqueza concreta de la "veta" que va a ser explotada. Éstos son aún problemas enormes; no se sabe con certeza cómo se forman los nódulos –a pesar de que hay diferencias notables entre los del Atlántico y los del Pacífico– y los geofísicos intentan localizar los lugares en los que existan mayores probabilidades de encontrar estos nódulos. Aunque no se ha puesto en marcha la explotación de esos nódulos, el gran atractivo comercial que presenta ha logrado que algunos fenómenos geofísicos de gran importancia sean mejor comprendidos. Al igual que ocurre con las reservas de hidrocarburos, si los geólogos son capaces de descubrir los lugares en los que se están formando actualmente estos depósitos, teóricamente se podría saber dónde existen las mayores probabilidades de encontrar yacimientos de nódulos formados con anterioridad a nuestros días. Y, a diferencia de las reservas de petróleo, es improbable que las reservas de minerales se evaporen o migren una vez formados.

Para explicar de qué manera la tectónica de placas puede servir para localizar probables reservas de petróleo y gas, lo hicimos en términos generales. En el caso de los depósitos metalíferos parece más lógico centrar la atención en el ejemplo concreto de una región en la que este tipo de depósitos se estén formando en la actualidad: el Mar Rojo. Este mar es un océano embrionario. A medida que África se desplaza hacia el oeste (y también hacia el norte, tendiendo a cerrar el Mediterráneo), está formando un centro de expansión a gran escala en el que existe un importante calentamiento asociado con la actividad tectónica. Este movimiento parece haber generado las condiciones idóneas para que se formen depósitos minerales en algunas zonas del fondo del Mar Rojo.

El primero de esos depósitos se trata en realidad de cubetas de salmueras calientes y fue localizado en 1966. Posteriormente se ha descubierto que, en realidad, hay una cadena de

este tipo de cubetas a lo largo de la espina dorsal del Mar Rojo, que contienen agua más caliente que la de los sectores adyacentes y una elevada concentración de sales metálicas, especialmente si se compara con el resto de las aguas del Mar Rojo o incluso con otros mares. Las concentraciones de materiales disueltos en las salmueras del Mar Rojo son muy superiores a las del agua marina normal y, además, los sedimentos del fondo de esas cubetas son muy ricos en metales pesados como el oro, la plata, el cobre, el plomo y el cinc. Si estas cubetas hubiesen existido en todas las cuencas relacionadas con la formación de valles por un rift, se sabría dónde buscar este tipo de yacimientos minerales fósiles. Pero hay una diferencia importante respecto a las reservas de hidrocarburos. Estos yacimientos metalíferos no necesitan la intervención de bacterias durante millones de años para resultar aprovechables. Las concentraciones pueden ser pequeñas, pero podrían ser utilizadas sin necesidad de grandes alardes técnicos en el caso de que la carencia de metales aumentara de forma alarmante. Las cubetas de salmueras calientes pueden incluso tener más interés que los nódulos submarinos para la extracción de metales raros.

Sin embargo, el descubrimiento de la primera cubeta de salmueras no fomentó el interés por su explotación. Pero en 1972 la situación cambió gracias a un equipo de investigadores alemanes que, a bordo del buque oceanográfico "Valdivia", descubrió trece nuevas cubetas de salmueras, elevando el número total de las mismas conocidas hasta aquel entonces en el Mar Rojo a diecisiete. Por primera vez fue posible efectuar investigaciones comparativas entre las diferentes cubetas para averiguar las características que podían ser consideradas como típicas de todos los sistemas semejantes al Mar Rojo, y las que eran simplemente particularidades que respondían a las condiciones locales existentes en las diferentes cubetas (fig. 2). Geológicamente, el Mar Rojo está compuesto al menos por dos partes distintas. La situación de las diecisiete primeras cubetas de salmueras descubiertas está expresada en el mapa de la página 33; entre la cubeta del Nereus y la

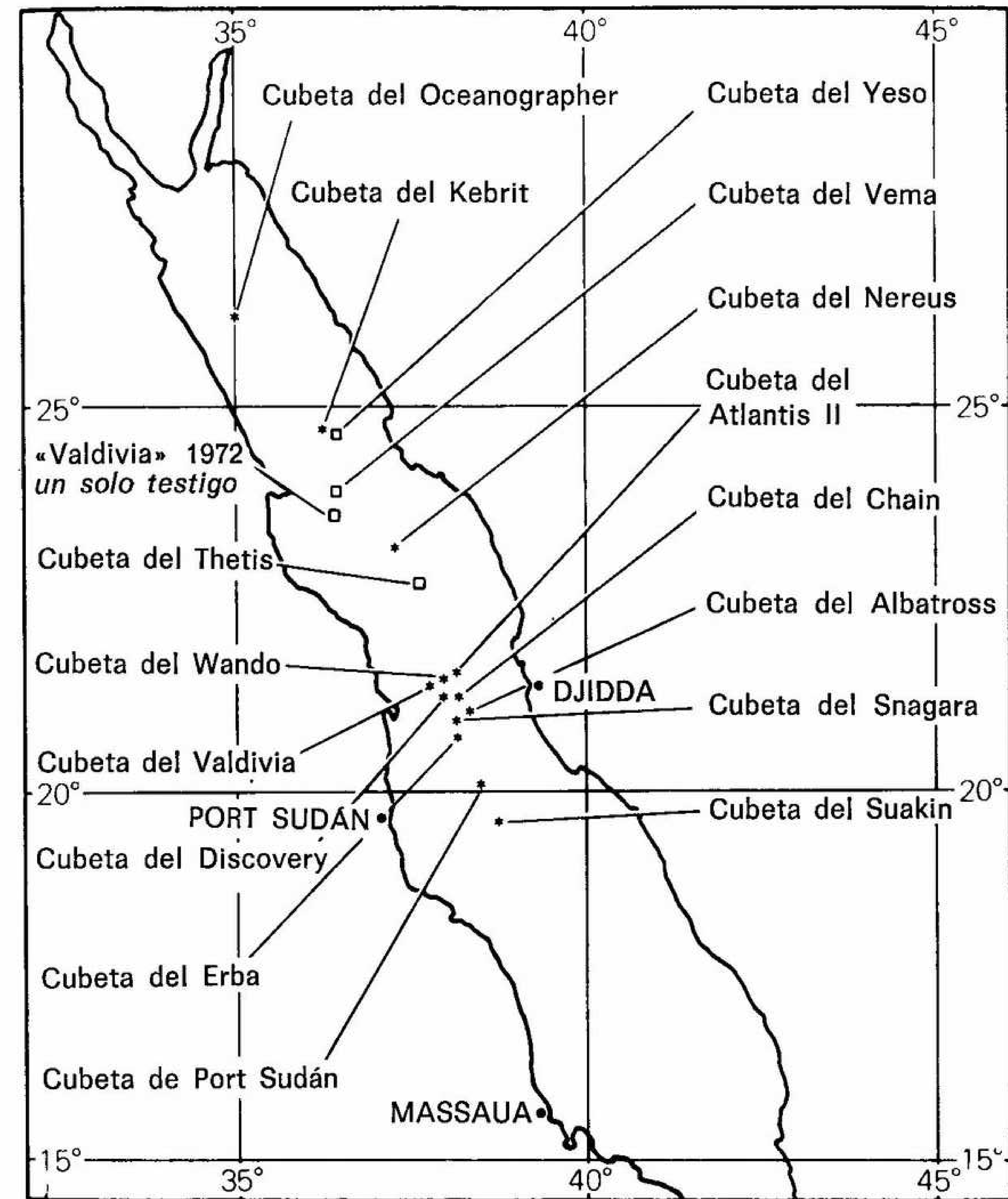


Fig. 2. Distribución de las cubetas de salmueras y de los sedimentos acumulados en el Mar Rojo. El mapa fue confeccionado en 1972 por H. Backer y M. Schoell; hasta el momento de escribir este libro no han sido descubiertas nuevas cubetas. (Reproducido bajo la autorización del Dr. Backer y de *Nature*.)

cubeta del Suakin, el fondo desciende suavemente desde los bordes de la cuenca hacia el centro del Mar Rojo; pero cuando se alcanzan los 500 ó 600 m de profundidad existe un fuerte desnivel que da paso a un estrecho surco de un kilómetro de profundidad que se extiende paralelamente a la dirección de máximo alargamiento del Mar Rojo ocupando su parte central. Y las cubetas de salmueras son depresiones extremadamente abruptas, de más de dos kilómetros de profundidad media, situadas dentro de ese surco. Sin embargo, más hacia el sur, el fondo del mar está formado por un conjunto de terrazas planas y alargadas; ésta es la razón por la que no existen cubetas de salmueras al sur de la cubeta del Suakin. Las características morfológicas del fondo, sin pozas estrechas y profundas en las que las salmueras estén protegidas de la acción de las corrientes, explica por qué no han sido encontradas salmueras en este sector. Y la más septentrional de las cubetas, la del Oceanographer, puede constituir una tercera subdivisión en la estructura geológica del Mar Rojo.

En las cubetas de márgenes abruptos las salmueras forman capas de distinto nivel de concentración salina. Las capas inferiores son las que contienen un mayor índice de salinidad (a mayor concentración corresponde mayor densidad), que va variando progresivamente hasta alcanzar menor concentración en las capas superiores. Estas últimas están situadas un kilómetro por debajo de la superficie, donde existe una zona de transición hacia la estructura normal de las aguas del Mar Rojo. Una vez ha sido localizada la cubeta en cuestión, el resto es fácil de investigar; en esencia, los trabajos consisten en descender botellas de muestreo desde el buque oceanográfico para recoger aguas de distintas profundidades; estas botellas tienen la particularidad de que una vez alcanzada la profundidad deseada se cierran automáticamente preservando en su interior las aguas, que serán analizadas posteriormente. Pero ¿de dónde proceden los metales de las salmueras?

Hay dos posibilidades; según la primera de ellas, las cubetas se habrían formado debido a la actividad tectónica asociada con el desarrollo de ese océano embrionario que es actualmente el Mar Rojo; la segunda posibilidad es que las cubetas estén relacionadas con la escasa profundidad del mar, hecho que parece cumplirse en la cubeta del Oceanographer. La teoría sostiene que, en tiempos geológicos pasados, el Mar Rojo se secó para ser resumergido posteriormente. Si eso hubiese ocurrido, el agua de las cubetas más profundas del surco central se habría ido evaporando dejando en su lugar depósitos de sal que ahora estarían siendo disueltos lentamente por el agua de mar que ha invadido de nuevo la zona. Pero la posibilidad más atractiva, y aparentemente probada, es que la actividad tectónica que calienta las cubetas, incluso mediante fenómenos volcánicos atenuados, provoca al mismo tiempo la introducción de nuevas sales metálicas que están favoreciendo la formación de depósitos más ricos y, por tanto, más ventajosos para el hombre.

Las investigaciones en la cubeta del Discovery han proporcionado algunos datos, actualmente considerados clásicos, acerca de las condiciones desarrolladas en esas cubetas. En ellas, la salinidad (calculada a partir de la medición de las sales de los distintos metales y no únicamente del cloruro de sodio) aumenta desde un cuarenta *por mil* (4 %), característico de las aguas de mar abierto del Mar Rojo, hasta más de un 250 por mil; este extraordinario incremento de la salinidad se efectúa en tan sólo unos 200 metros de profundidad. En el mismo intervalo batimétrico, la temperatura de la salmuera pasa de unos 22 °C hasta unos 44 °C; este dato reafirma la posibilidad de la existencia de un calentamiento de origen volcánico o tectónico en los fondos de esta región.

Al parecer, las propiedades de las cubetas varían bastante rápidamente, hecho que demuestra la gran actividad de los procesos tectónicos que afectan al fondo. La cubeta del Atlantis II, una de las primeras en ser descubierta, ha sido investigada por diversos buques oceanográficos desde 1966. Entre 1966 y 1972, la temperatura del fondo de la cubeta aumentó desde 55,9 °C hasta 60,1 °C, y la capa superior de agua se calentó a unos 50 °C a principio de los años 70. Esto indica que se generó una tremenda cantidad de calor en el

fondo de la cubeta en un período no superior a cinco o seis años. Según los cálculos de un equipo perteneciente al Woods Hole Oceanographic Institute de Massachusetts, el incremento de la temperatura de la cubeta y el del volumen del agua afectada pudo haber sido provocado por una entrada de salmueras a una temperatura de al menos 113 °C en el fondo. Aunque esta temperatura está por encima del punto de ebullición del agua al nivel del mar, la presión existente en el fondo haría que la ebullición no se produjese a menos que se alcanzase una temperatura de 360 °C. Las investigaciones también han demostrado que la cantidad de hierro y manganeso en la salmuera de la cubeta del Atlantis II ha ido aumentando desde 1966; por tal razón, es probable que las salmueras calientes que se vayan formando en el futuro tengan concentraciones aún más elevadas. Lo único que no está claro es de dónde procede el agua de las salmueras que entran por el fondo de las cubetas, pero lo que sí es evidente es que debe haber algún tipo de relación entre las salmueras y las rocas volcánicas adyacentes.

La cubeta del Atlantis II es un caso muy especial. Posee una temperatura tan elevada que incluso se han observado corrientes de convección en sus aguas; a medida que aumenta el calor, la densidad de las aguas del fondo disminuye, provocando su trasvase hacia las capas de aguas más frías. A causa de esta actividad, la cubeta del Atlantis II está derramando actualmente salmueras hacia otras cubetas vecinas; cuando la salmuera rica en metales alcanza el borde de la cubeta y se enfría, su elevada densidad hace que se hunda de nuevo hacia las zonas circundantes. Pero incluso en las cubetas que no están interconectadas por este tipo de actividad convectiva, las temperaturas y las concentraciones de metales son tan semejantes que parece lógico presumir la existencia de túneles que aseguren dicha conexión por debajo del subsuelo marino. Esos túneles permitirían a su vez explicar la procedencia de las salmueras calientes que entran por el fondo de la cubeta del Atlantis II, ya que debido a la proximidad del magma volcánico (rocas fundidas) la temperatura del

agua aumentaría considerablemente y absorbería al mismo tiempo grandes cantidades de sales metálicas procedentes del magma. La teoría era correcta. Pero la única manera que tenían los científicos para estar seguros de que las cubetas no eran simplemente el resultado de un proceso de evaporación era encontrar una de ellas con propiedades distintas y que respondiese fielmente a la hipótesis evaporítica. La cubeta del Oceanographer, investigada en 1972 por un equipo del Imperial College de Londres, reunía estas condiciones.

Esta cubeta se encuentra situada fuera del surco del Mar Rojo, a 26° 16,6′ N y 30° 01′ E. Al este y al oeste de la cubeta, la profundidad del mar es de 960 m, mientras que en la cubeta se alcanzan los 1.528 m; su anchura es de sólo 0,6 millas náuticas en la isobata (curva que une la punta del fondo oceánico a igual profundidad) de 1.350 m, y de 0,4 millas náuticas en la isobata de 1.450 m, con una longitud media de menos de dos millas náuticas (esta mezcla de unidades científicas y náuticas proviene de los datos proporcionados por los científicos que se encontraban a bordo del barco). Se analizaron muestras de las salmueras y de los sedimentos con el fin de averiguar el origen de la cubeta del Oceanographer. La cantidad de metales (como hierro y cobre) hallada en la salmuera era mayor que la del agua marina normal, pero menor que las concentraciones de las cubetas activas del tipo Atlantis II. Expresado en unidades de peso, el agua de mar contiene 0,02 miligramos (mg) de hierro por cada kilo de agua; la cubeta del Atlantis II posee 80 mg por kilo y la del Oceanographer 0,2 mg por kilo. Según el equipo investigador del Imperial College, los sedimentos del fondo eran ricos en materia orgánica y emanaban un intenso olor a sulfuro de hidrógeno (el clásico olor a huevos podridos). A través de análisis más cuantitativos, averiguaron que la distribución de elementos metálicos en los sedimentos era muy parecida a la existente en el fondo de los fiordos noruegos.

Estos datos apuntaban la posibilidad que la cubeta del Oceanographer, la más septentrional de las hasta ahora conocidas en el Mar Rojo, estuviera efectivamente relacionada

con un episodio de desecación al que siguió una nueva entrada de aguas marinas. Los depósitos de sal formados durante esa desecación serían parecidos a los que recientemente han sido analizados en el Mediterráneo y que indican episodios sucesivos de este proceso; quizás la desecación del sector norte del Mar Rojo esté relacionada con las oscilaciones del nivel del mar en el Mediterráneo ocurridas a lo largo de los tiempos geológicos.

Para los geofísicos, el descubrimiento de un segundo tipo de cubeta de salmueras en el Mar Rojo era la pieza clave que necesitaban para demostrar que su modelo de formación de salmueras era correcto. Las investigaciones en el Mar Rojo han demostrado que, en realidad, existen dos tipos distintos de cubetas que responden nítidamente a las dos teorías formuladas con anterioridad. La cubeta del Oceanographer es de origen claramente evaporítico, mientras que las cubetas situadas más al sur pertenecen a una categoría distinta de cubetas activas relacionadas con los procesos tectónicos –los procesos de la deriva continental– que se desarrollan en la región. Los estudios acerca de la formación de los depósitos minerales están aún en un estadio inicial si se compara con el desarrollo alcanzado por las teorías acerca de la formación de yacimientos de petróleo y gas. Por el momento, se han elaborado modelos que permitan predecir dónde pueden encontrarse estos depósitos minerales. No obstante, este trabajo se ha llevado a cabo, al menos en gran parte, en el campo de la prospección de hidrocarburos utilizando la teoría de la deriva continental. Un geofísico con una buena visión de las nuevas ideas acerca de la tectónica de placas debería ser capaz de saber en qué lugares del mundo la actividad tectónica puede haber dado lugar a la formación de yacimientos minerales, los cuales aunque no sean explotables en el presente sí que serán económicamente rentables en un futuro muy próximo. El estudio de la Geofísica y la tectónica de placas (desarrollada a partir de los años 60) es de gran importancia para la comprensión de la estructura de la Tierra y del significado de la presencia del hombre en ese diminuto planeta.

III. VIEJAS TEORÍAS DE LA TIERRA

La noción de deriva continental, tal como actualmente se conoce, no habría surgido si antes el hombre no se hubiese dado cuenta de la esfericidad de la Tierra y del contorno general de los grandes continentes. Uno de los hechos más estudiados en torno a este tema es la peculiar configuración actual de la costa occidental de África, que parece encajar perfectamente con el hueco entre Norteamérica y Sudamérica. En 1620, Francis Bacon escribió acerca del Nuevo y Viejo Mundo: «Ambas regiones tienen istmos y cabos similares y eso no es por azar. Además, ambas son amplias y extensas hacia el norte, y estrechas y alargadas hacia el sur.» Este ejemplo muestra que las especulaciones acerca de los motivos de la actual distribución de los continentes aparecieron inmediatamente después de que se tuviese un conocimiento fiable de la cartografía terrestre.

Las primeras noticias que tenemos acerca de las ideas del hombre sobre su papel en el Universo nos han sido legadas por China, la más antigua de las civilizaciones. Los chinos tienen bien merecida su fama como astrónomos, y especialmente como observadores de supernovas y cometas; pero quizás es menos conocido el hecho de que los filósofos-científicos chinos desarrollaron sus propias teorías acerca de los terremotos, y que también inventaron instrumentos para registrar dichas sacudidas de la Tierra. El motivo principal del desarrollo de este tipo de investigaciones en China es su situación geo-

gráfica en una región donde los movimientos sísmicos son comunes, además de un correcto estudio del comportamiento y la composición de la Tierra. Algunas de las ideas más antiguas concebían los terremotos como resultado de un balance de fuerzas entre el Yin y el Yang; las sacudidas sísmicas ocurrirían cuando el Yang fuese vencido por el Yin. Estos conceptos primitivos dieron lugar a lo que podría denominarse la teoría "neumática" de los terremotos, desarrollada de forma bastante independiente pero casi con las mismas formulaciones de las civilizaciones mediterráneas de la época, hace dos mil años.

Otras antiguas ideas griegas sugerían que los terremotos se producían por explosiones o intrusiones bruscas de agua a través de los huecos del interior de la Tierra, o, por el contrario, debido al secado de grandes masas de rocas previamente saturadas de agua que provocaban la caída de enormes bloques en el interior de profundas cavernas. Estas ideas pueden parecer un poco infantiles comparadas con los conocimientos modernos, pero no se debe olvidar que los antiguos pensadores que las formularon no poseían la información actual y que sus ideas constituyeron un serio intento de estudiar la estructura de la Tierra a partir de los más avanzados conocimientos existentes en aquella época. De todos modos, las inexactitudes de aquellas teorías evidencian la necesidad de tener una concepción global de la Tierra para poder explicar los distintos fenómenos. El desarrollo de las teorías acerca de la constitución y el funcionamiento de la Tierra está estrechamente ligado a la historia de la exploración de la Tierra. Dejando aparte los conocimientos adquiridos por los exploradores nórdicos (y por sus posibles predecesores en las rutas marítimas al Nuevo Mundo), la historia de los grandes descubrimientos empieza realmente en el siglo XV, con las exploraciones europeas de las hasta entonces desconocidas rutas náuticas hacia el oeste y el sur. Cristóbal Colón, el más famoso de los grandes descubridores, debe su fama a la verdadera distribución de los continentes, distinta a como él imaginó.

Unos 230 años antes de Jesucristo, Eratóstenes de Cirene calculó la circunferencia de la Tierra y obtuvo una cifra bastante próxima a la verdadera –unos 40.000 km. Hizo sus cálculos midiendo la longitud de la sombra proyectada por una vara vertical en Alejandría, al atardecer del día del solsticio de verano, cuando, según él creía, el Sol estaba exactamente encima de Siena, en el Alto Nilo (hoy Asuán). Las mediciones de Eratóstenes mostraron que la circunferencia de la Tierra era aproximadamente cincuenta veces la distancia entre las dos ciudades. Los astrónomos modernos pueden hallar errores en todos y cada uno de los cálculos eratostenianos, pero los resultados finales son muy semejantes.

Algunos cálculos ulteriores acerca del tamaño de la Tierra no fueron tan acertados. El cálculo de la circunferencia terrestre mencionado por Tolomeo en sus escritos y aceptado casi como un dogma durante 1.500 años sólo equivalía a cuatro quintas partes –33.000 kilómetros– del valor verdadero. La obra geográfica de Tolomeo no fue traducida al latín hasta principios del siglo XV. Con la adición a esta obra de nuevas informaciones obtenidas gracias a los viajes de Marco Polo y modificando algunos datos de manera que se ajustasen más a sus propias creencias, Colón se autoconvenció –aunque pocos le creyeron en su tiempo– de que podían alcanzarse los territorios del Lejano Oriente saliendo de Europa, por mar, en dirección contraria, es decir, hacia occidente.

Según Tolomeo, la distancia entre Portugal y el extremo más alejado de Asia era de unos 16.500 kilómetros, cifra 1,5 veces mayor que la real. Añadiendo China y Japón a los límites de la geografía de Tolomeo se obtenía una cifra de 4.780 kilómetros, que aumentaba en dos tercios el tamaño de la Tierra tal como la concebía Tolomeo. Colón aún afinó más las cifras haciendo uso de los cálculos de otro astrónomo, Alfragenus o Alfrageno (musulmán del siglo IX), lo que le permitió corregir y rebajar a menos de 30.000 kilómetros el valor de la circunferencia terrestre generalmente aceptado como correcto desde los tiempos de Tolomeo. Colón no fue el primero –ni tampoco el último– en saber escoger las informaciones más precisas de entre todos los datos existentes.

Cuando acabó la refundición de todos los datos, Colón creyó haber demostrado que Japón se encontraba sólo a 4.300 kilómetros al oeste de las Islas Canarias, es decir, en la latitud en donde actualmente está situada Cuba. Aunque Colón difícilmente habría finalizado con éxito un viaje de 19.000 kilómetros –distancia real entre Europa y el Extremo Oriente por la ruta occidental–, lo cierto es que sus errores, su insistencia y su intrepidez hicieron posible el descubrimiento de América.

Hasta el día de su muerte, ocurrida en 1506, Colón creyó no sólo haber abierto la ruta occidental a Asia sino incluso haber alcanzado la desembocadura del Ganges en su cuarto y último viaje. Pero muy pronto esta idea se desechó frente a la evidencia del descubrimiento de un Nuevo Mundo. El primer mapa en que las tierras recién descubiertas aparecían bajo el nombre de América (o también Continente Austral o del Sur) y separadas de Asia por un gran océano fue dibujado en 1507 por un alsaciano, un tal Martin Waldseemueller. Trescientos cincuenta años más tarde, y gracias al trabajo de navegantes y exploradores, ya se conocía la localización precisa de los restantes continentes, incluyendo la Antártida. Con el avance de los conocimientos geográficos, empezaron a surgir nuevas especulaciones sobre temas geológicos y geofísicos, lo cual constituyó la plataforma de lanzamiento de la moderna teoría de la tectónica de placas.

Puede considerarse que las ciencias geológicas empezaron al descubrirse conchas marinas en tierra firme; este hecho implicaba que la superficie de la Tierra no siempre había sido tal como ahora se conoce. En un principio, este descubrimiento provocó controvertidas discusiones teológicas. Por un lado, se consideró que esas conchas probaban la existencia del diluvio universal; por otro lado, se llegó a pensar que se trataba de productos del diablo puestos en la Tierra para confundir el intelecto del hombre. Pero posteriores investigaciones acerca de los cambios ocurridos en la superficie de la Tierra demostraron que todo ello era el resultado de un largo proceso de desarrollo geológico; y esta constatación provocó no pocos conflictos con las autoridades eclesiásticas. Comparando los actuales conocimientos acerca de la historia de nuestro planeta (véase capítulo 2), resulta curioso recordar que hace tan sólo 300 años, a mediados del siglo XVII, el arzobispo Ussher realizó su famoso cálculo sobre la fecha de la Creación, según el cual el Infierno y la Tierra fueron creados la noche del domingo 23 de octubre del año 4004 antes de Jesucristo. Esta escuela de pensamiento, que atribuía a la Tierra una historia tan corta, justificaba los grandes cambios ocurridos en la superficie de la Tierra a consecuencia de catástrofes naturales, como el diluvio. Hasta que no se realizó un estudio correcto de la edad de la Tierra, no se pudieron interpretar los cambios geológicos como el resultado de una lenta y constante evolución.

Uno de los científicos del siglo XVII que rechazó la interpretación catastrofista de los cambios geológicos fue Robert Hooke. Para él la presencia de fósiles marinos en tierra firme era la prueba evidente de que existieron ciertos cambios cíclicos de la tierra y el mar transcurridos a lo largo de dilatados períodos de tiempo. Sostenía que las rocas se formaban por el efecto del calor existente debajo de la superficie de la Tierra, o por otros procesos, y posteriormente estableció una relación entre los movimientos verticales de la corteza y la actividad sísmica (de hecho, sugirió que las Islas Británicas se levantaron sobre el mar a medida que el fondo del Atlántico se hundía). Hooke también interpretó las fluctuaciones magnéticas y los cambios climáticos de una forma sorprendentemente moderna; pero a pesar de que sus teorías geológicas fueron publicadas en 1705 (después de su muerte), gozaron de escasa aceptación en su época, y al parecer fueron olvidadas o ignoradas deliberadamente. Tuvo que transcurrir un siglo para que los geólogos valorasen adecuadamente las ideas de Hooke.

La teoría sostenida por unos pocos geólogos sobre la edad de la Tierra, valorada en miles de millones de años de antigüedad, no era tenida en cuenta. El gran explorador Alexander von Humboldt explicó con cierto detalle cómo el Nuevo y

el Viejo Mundo se habían separado debido a los efectos producidos por las aguas del diluvio universal que, circulando de norte a sur, habían excavado el Océano Atlántico. Von Humboldt estudió las múltiples similitudes morfológicas entre los continentes situados a ambos lados del Océano Atlántico, pero nunca las interpretó en términos de deriva continental. La publicación de argumentos geológicos que pusiesen de manifiesto las similitudes entre los continentes que rodean el Atlántico tuvo que esperar otro medio siglo, hasta 1858, año en que se publicó la obra del americano, residente en París, Antonio Snider, titulada *La Création et ces mystères devoilés*. En este libro se reconstruyó por primera vez el supercontinente que existió antes de la abertura del Atlántico (fig. 3). Con esta hipotética situación continental –que difiere en algunos aspectos respecto a las modernas reconstrucciones– Snider intentaba explicar las similitudes entre los fósiles hallados en vetas de carbón en Europa y Norteamérica basándose en la teoría de que un hecho catastrófico como el diluvio universal había provocado la separación continental. La reconstrucción de Snider significó el inicio del reconocimiento geológico de la noción de deriva continental, aunque no su aceptación, producida cien años más tarde.

Hay un versión de la deriva catastrófica de los continentes que es especialmente llamativa. La teoría achaca la rotura del antiguo supercontinente a un proceso a consecuencia del cual la Luna habría sido expelida de la Tierra en una época muy primitiva; aunque actualmente se sabe, en parte gracias al estudio de las rocas lunares, que la Tierra y la Luna se formaron por separado y que nunca constituyeron un solo planeta en el sentido en que lo concebían los científicos decimonónicos. La primera formulación completa de la rotura continental fue descrita por Osmond Fisher, en un artículo publicado en *Nature* el 12 de enero de 1882. Fisher retomó las especulaciones de George Darwin (segundo hijo de Charles Darwin), quien consideraba que si la Tierra se desaceleraba debido al efecto de las mareas solares, pudo existir hace 57 millones de años una situación en la que el período de rota-

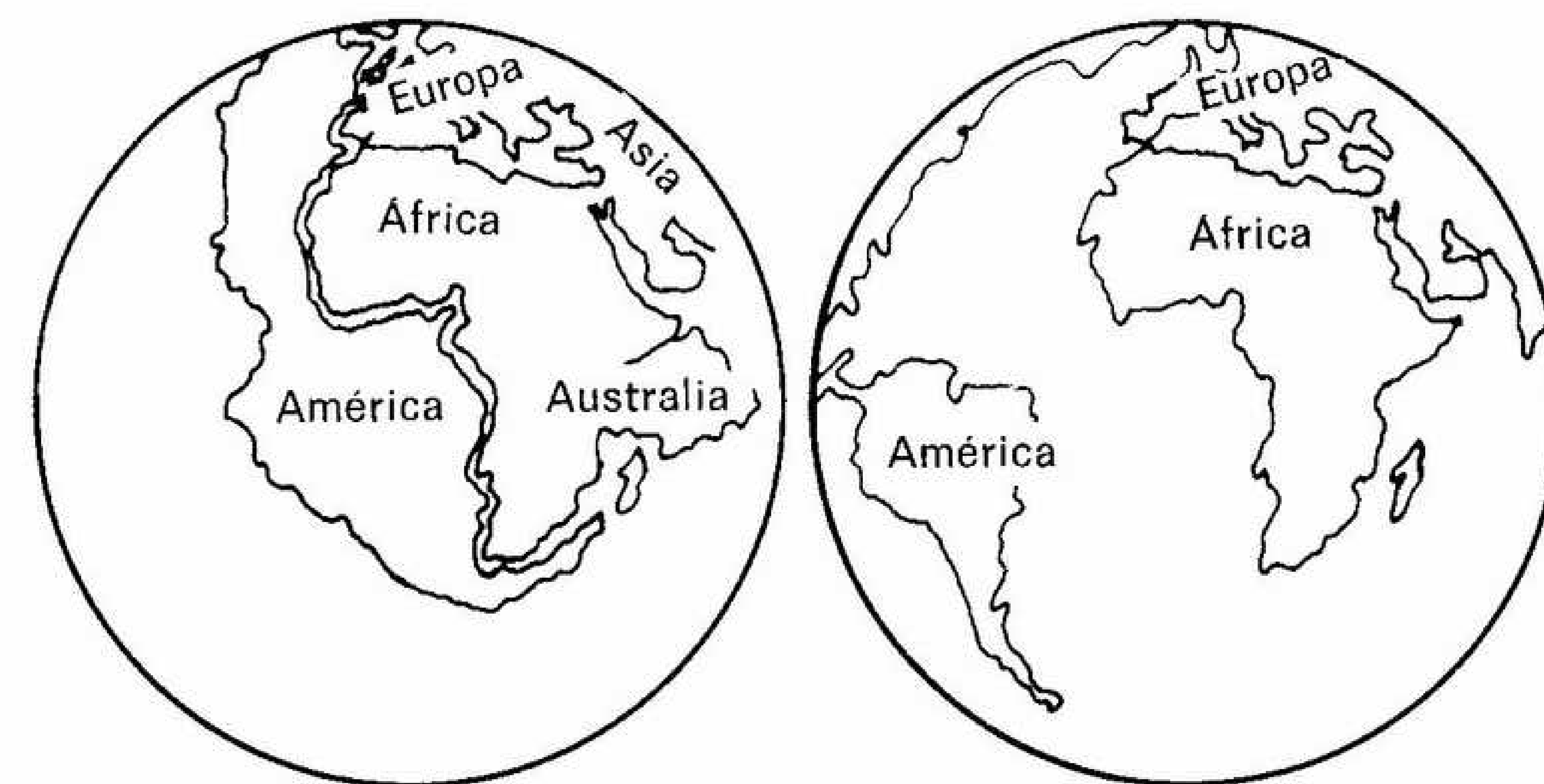


Fig. 3. La reconstrucción de Snider de la Tierra primitiva, elaborada en 1858 para explicar las semejanzas existentes entre fósiles encontrados en Europa y América.

ción (que sería por aquel entonces de cinco horas) estuviese en resonancia con la marea solar, creándose así las condiciones para que la primitiva Tierra se partiese en dos pedazos desiguales. Fisher sugirió que la gran hendidura resultante de esta partición de la corteza terrestre (la cuenca del Pacífico) se habría rellenado parcialmente de rocas fundidas procedentes del interior de la Tierra que se solidificaron posteriormente. Dice Fisher:

«Debió existir necesariamente un movimiento hacia el centro de la cavidad que habría arrastrado consigo la corteza granítica enfriada, la cual, flotando en las capas fluidas superiores, permanecería en la superficie de la Tierra. Lo que restó de dicha corteza granítica se rompería posteriormente en varios fragmentos representados actualmente por los continentes. Este proceso habría provocado la gran abertura que es el Atlántico y explicaría el paralelismo existente entre los contornos de América y el Viejo Mundo.»

Actualmente sabemos que la Luna ya era un cuerpo separado de la Tierra hace al menos 4.000 millones de años y

que evolucionó como un planeta independiente regido por sus propias leyes. Pero las especulaciones de Fisher contienen un elemento precursor que se desarrollaría posteriormente a través de la teoría de la deriva continental –nos referimos a la idea de que los continentes son masas graníticas que flotan sobre un interior fundido y que se desplazan debido a las corrientes existentes en esas capas fluidas. La idea alternativa, ampliamente aceptada por la comunidad geológica de finales de siglo, era que los continentes no se desplazaban lateralmente y que los océanos se habían formado debido al hundimiento de los continentes-puente (o "land bridges") que se encontraban unidos a los actuales continentes.

En su forma más avanzada, esta teoría consideraba que la Tierra se contraía por enfriamiento. A medida que el interior se iba contrayendo y colapsándose se produciría la caída de grandes bloques de la corteza que rellenarían los huecos existentes, dando lugar a las cuencas oceánicas, teoría que supone un curioso retorno a algunas de las especulaciones de los antiguos chinos acerca de los terremotos. La teoría de los puentes continentales representaba una posibilidad bastante factible de explicar las similitudes entre los fósiles hallados en el Viejo y Nuevo Mundo. La solución a estos cambios terrestres interesó sobremanera a la sociedad victoriana del siglo XIX, que se sentía atraída por el misterio de leyendas tales como la desaparición de la Atlántida.

El concepto global de las ciencias de la Tierra desarrollado a partir de la idea de un planeta en enfriamiento y contracción fue presentado por primera vez por el geólogo Eduard Suess, aunque todas estas teorías se basaban en una suposición que pronto se revelaría como incorrecta. La Tierra no está simplemente enfriándose desde un momento inicial de máxima temperatura –lo que implicaría que nuestro planeta se formó hace únicamente unas pocas decenas de millones de años–, sino que la superficie aún está recibiendo calor desde el interior. Esta fuente de calor procede de un proceso de desintegración de elementos radiactivos que ha mantenido el interior de la Tierra lo suficientemente caliente para que

aún existan en él rocas fundidas desde hace, no decenas, sino miles de millones de años. La comprensión de los procesos que ocurren en la Tierra se debe a una síntesis de las investigaciones realizadas en diversos campos de la ciencia, desde la física hasta la biología, que se ocupa del estudio de los fósiles y de la evolución animal.

En el primer cuarto del siglo XX, dos geólogos americanos, Frank Taylor y Howard Baker, elaboraron independientemente sus propias teorías sobre la deriva continental, al mismo tiempo que el alemán Alfred Wegener (considerado actualmente como el padre de dicho concepto) formuló sus ideas sobre el tema. La razón por la que Wegener ocupa tan destacado lugar en la historia de la Geología es bien simple: él no se limitó, como hicieron sus colegas, a publicar sus ideas y a esperar que fuesen aceptadas o rechazadas por la comunidad geológica, sino que dio publicidad a las mismas. Además, Wegener, que era astrónomo, meteorólogo y geofísico, tenía una visión poco corriente de la Tierra como un todo y pensó que tenía poco que perder si se convertía en un defensor acérrimo de la teoría de la deriva continental.

Al parecer, Wegener ya empezó a interesarse por la deriva continental en 1910, cinco años antes de que recibiese el doctorado. Sus ideas aparecieron publicadas en 1915 en una breve monografía que revisó en 1920. Pero fue la tercera edición de esta obra, publicada en 1922 y traducida al inglés en 1924, la que dio lugar a las acaloradas discusiones que se suscitaron acerca de la deriva continental durante el segundo cuarto del siglo XX. No todos los opositores de Wegener plantearon teorías racionales y científicas; muchos de ellos no hicieron el más mínimo intento para justificar el porqué de su oposición, sino que se limitaron a objetar que esas teorías eran increíbles; otros hallaron errores de detalle en las ideas wegenerianas que hicieron extensivos a todo el concepto de la deriva continental, el cual fue tildado de este modo como incorrecto. No obstante, y sin entrar en consideraciones acerca de los aspectos puramente geológicos de la teoría, algunos biólogos y geógrafos estaban dispuestos a aceptar las eviden-

cias puestas de manifiesto por Wegener acerca de las similitudes entre los fósiles de animales y plantas hallados en continentes tan distantes. A pesar de todo, esa corriente favorable fue canalizada hacia el resurgir de la idea de los puentes continentales o continentes-puente. Actualmente, muchos aspectos de las ideas de Wegener han sido incorporados a la moderna teoría de la tectónica de placas. Según Wegener:

1. Los continentes y los fondos oceánicos tienen una naturaleza esencialmente distinta. Los continentes están formados por bloques de rocas graníticas ligeras (sial, de sílice y aluminio) que flotan sobre rocas basálticas más densas (sima, de silicio y magnesio), las cuales a su vez afloran en los fondos oceánicos.
2. La extensión inicial ocupada por el sial se ha reducido y su grosor ha aumentado debido a los plegamientos a través de los tiempos geológicos. Simultáneamente a este proceso se fue rompiendo en fragmentos, los cuales cubren actualmente un tercio de la superficie de la Tierra.
3. A grandes rasgos, los actuales bloques continentales tienen los mismos contornos que ya tenían en el Mesozoico al romperse el supercontinente que los engendró.
4. Valiéndose de sus amplios conocimientos sobre todos los campos de las ciencias de la Tierra, Wegener consiguió reconstruir ese supercontinente ensamblando cordilleras, formaciones sedimentarias, evidencias de las huellas dejadas por antiguas glaciaciones y la distribución de plantas y animales, tanto fósiles como vivientes. Esa capacidad integradora es el aspecto más notable de la versión wegeneriana de la deriva continental y a ella se debe la aceptación en los años 20.
5. Wegener fue más lejos que sus predecesores indicando que los valles de rift constituían una primera fase en la abertura de los continentes. Explicó que las cordilleras montañosas eran, en muchos casos, el resultado del plegamiento de los bordes de los bloques continentales producido a medida que se iban desplazando sobre un material más denso, de forma similar al movimiento de los icebergs.

6. Basándose en datos climáticos, Wegener llegó a la conclusión de que, al igual que los continentes, también los polos se han desplazado (migración de los polos). Según esta idea, la superficie de la Tierra se ha movido 4.000 kilómetros respecto a los polos, desde el período Pérmico.
7. Wegener no recurrió a la idea de una Tierra en contracción o en expansión para justificar la existencia de una fuerza motriz responsable de la deriva continental. Su teoría explicaba que la fuerza motriz era suministrada por las fuerzas rotacionales y mareales, lentas pero constantes, que han actuado a lo largo de los tiempos geológicos.
8. Algunas mediciones directas de la latitud y la longitud demostraban, según Wegener, que ciertas áreas terrestres –especialmente Groenlandia– se estaban moviendo a velocidades fácilmente mensurables.

Quizás donde Wegener se equivocó fue en su hipótesis acerca del mecanismo de la deriva continental. Las fuerzas externas por sí solas no pueden dar lugar a la separación de los continentes produciendo movimientos en muchas direcciones distintas durante millones de años. Harold Jeffreys, de la Universidad de Cambridge, contribuyó en gran manera a clarificar la cuestión en los años 20 a través de su obra *The Earth* (Jeffreys nunca revisó sus manuscritos, ni siquiera cuando la deriva continental, transformada ya en la teoría de la tectónica de placas, se convirtió en la investigación geofísica de moda en los años 60). En 1928, en el transcurso de un simposio patrocinado por la "American Association of Petroleum Geologists", Wegener fue nuevamente atacado por no formar parte de la comunidad geológica. Su muerte, pocos años después de este acto, silenció durante décadas nuevas teorías sobre la deriva continental. Irónicamente, y cuando todas las controversias parecían haber sido satisfactorias, pero erróneamente resueltas a favor de los tradicionalistas, Arthur Holmes, de la Universidad de Edimburgo, propuso una nueva teoría acerca de la deriva continental que anulaba las objeciones de Jeffreys. Dicha idea implicaba un proceso interno muy

parecido al actualmente aceptado: corrientes de convección impulsadas por el calor de origen radiactivo. No obstante, la idea de Holmes no fue aceptada en los años 30, a pesar de conocerse todas las evidencias necesarias para convencer a los geólogos de la realidad de la deriva continental. Aún serían necesarios otros treinta años para que el *establishment* geológico la aprobara plenamente.

¿Por qué se tardó tanto en convencer a la comunidad científica? ¿Fueron los descubrimientos de los años 60 realmente tan convincentes? Simplemente, los geólogos de los años 30 no estaban en condiciones de aceptar tan brusco cambio en sus dogmas, hecho que suponía invalidar todos los datos acumulados cuidadosamente durante años y años. Se cuenta que uno de los participantes en el simposio de 1928 dijo: «Si aceptamos la hipótesis de Wegener, ya podemos tirar a la basura todos los conocimientos que hemos estado enseñando durante los últimos setenta años y empezar de nuevo.» Años más tarde se llegó a decir que la idea de Wegener era tan ridícula que nunca debía ser mencionada a los estudiantes porque podría inducirles a confusión; hoy en día, le sería realmente difícil a un geofísico obtener un puesto de profesor en una universidad si no creyese en la deriva continental.

Sin embargo, los modelos acerca de los procesos convectivos, probablemente responsables de la deriva de los continentes, aún distan de ser totalmente satisfactorios. Parece ser que los científicos de los años 60 estaban mejor dispuestos a echar dogmas por tierra que sus predecesores de los años 20 y 30, pero el desarrollo de las técnicas y los conocimientos geológicos contribuyó enormemente a que la teoría de la deriva continental fuese aceptada en el relativamente más receptivo ambiente de los años 60. Antes de entrar en los detalles de esta teoría, transformada en la moderna tectónica de placas, es importante dar un repaso a los procedimientos de obtención de datos utilizados por geofísicos y geólogos para construir los modelos globales de la Tierra.

IV. HACIA UNA NUEVA CONCEPCIÓN DEL MUNDO

Nuestra noción de la Tierra como planeta se ha desarrollado a partir de los conocimientos aportados por distintas ciencias: geología, meteorología, oceanografía, astronomía y otras. Pero la visión definitiva depende de la correcta aplicación de todos los datos aportados por las diferentes áreas de conocimiento: es la tarea del no especialista. Algunos elementos del rompecabezas terrestre son menos importantes que otros, no porque en realidad lo sean, sino porque aún no conocemos lo suficiente sobre los mismos como para valorar su verdadera importancia. En el caso de los océanos, por ejemplo, es fácil darse cuenta del papel fundamental que éstos desempeñan en el desarrollo de la Tierra y de su interacción con la atmósfera, afectando profundamente al clima. Pero comprender el auténtico funcionamiento de los océanos no tiene nada de simple; hasta ahora, la oceanografía sólo ha dado los primeros pasos.

La importancia de la atmósfera sobre el sistema terrestre en conjunto parece más evidente que la de los océanos. Ningún científico podría especular acerca de los cambios que se producen en la superficie de la Tierra si no existiese una atmósfera que le permitiese respirar. Tanto la atmósfera como los océanos juegan un papel muy importante en los cambios que se producen en nuestro planeta, especialmente a través del proceso de la erosión. Al mirar un río normal en un valle normal es fascinante pensar acerca de lo mucho que ha tar-

dado el hombre para darse cuenta de que el valle entero ha sido excavado en la superficie de la Tierra por la acción, quizás durante miles de años, de una diminuta corriente de agua. El viento, que transporta partículas abrasivas de polvo, también erosiona la superficie de la Tierra, rebajando cordilleras enteras a lo largo de los tiempos geológicos. Y tal como ya hemos visto, son los ríos del pasado los que han dado lugar a los depósitos orgánicos que ahora se utilizan como fuente de combustible. Sería totalmente erróneo minimizar la importancia del viento y del agua como responsables de los cambios que ocurren en la Tierra. La atmósfera y los océanos, probablemente formados a partir del escape de elementos ligeros procedentes de las rocas sólidas, deben su existencia a la presencia de una Tierra ya constituida como tal. El objetivo principal de la geología y de la geofísica, la cual ha dado lugar a una nueva visión de la deriva continental en términos de la tectónica global, está relacionado con la Tierra sólida (o, en su interior, semi-sólida). Pero incluso en este terreno debe establecerse la relación entre las diversas ciencias para llegar a elaborar una teoría coherente.

La primera función de las técnicas geológicas es la obtención de muestras de rocas y minerales para ser analizadas en el laboratorio e interpretarlas. El proceso de obtención de especímenes geológicos abarca desde la extracción de fragmentos de roca golpeando las capas con un martillo hasta la obtención de muestras de los fondos oceánicos mediante aparatos especiales. Una de las principales ayudas para el geólogo es la presencia de restos fosilizados de animales y plantas en los diferentes estratos rocosos.

Cuando una criatura marina muere, sus restos se hunden hasta el fondo del océano incorporándose a los lodos a partir de los cuales, y a través del tiempo geológico, se formarán rocas que, posteriormente, serán levantadas hasta la superficie para integrarse, quizás, en nuevas cordilleras montañosas. De manera semejante, los hojas de los helechos pueden caer en fondos pantanosos y ser preservadas como fósiles. Cuando una especie desaparece siguiendo el proceso de evolución natural, nunca más vuelve a aparecer en rocas más jóvenes; y como no existen dos especies idénticas, ninguna especie nueva es exactamente igual a otra ya extinguida. Por eso, la edad relativa de un nivel de rocas o estrato puede ser determinada a partir de su contenido fosilífero. El descubrimiento y la comprensión de los procesos radiactivos ha dado a los geólogos un nuevo método de datación de rocas consistente en la medición de los períodos de desintegración de elementos radiactivos presentes en las rocas. Gracias a una combinación de todas estas técnicas se ha podido elaborar la escala de los tiempos geológicos de la página 15 que permite evaluar la edad verdadera de la Tierra.

Mientras que la geología se ocupa fundamentalmente del *status quo* de la corteza terrestre, la geofísica podría definirse como la ciencia que estudia los grandes cambios que se producen en la Tierra y en el interior de la misma. La técnica geofísica más importante es la sismología, es decir, el estudio del interior de la Tierra mediante ondas sónicas de baja frecuencia producidas por terremotos o explosiones. Es relativamente sencillo registrar las ondas sonoras, las cuales producen una ligera sacudida en las rocas que se convierte en un trazo de la actividad sísmica dibujado sobre un mapa o una gráfica. La interpretación de esas ondas sísmicas es un problema de una complejidad comparable, según Sir Edward Bullard (uno de los pioneros del moderno concepto de la tectónica de placas), al hecho de intentar deducir la estructura de un gran piano escuchando únicamente el ruido que produce cuando es empujado a lo largo de un tramo de escaleras. Actualmente las técnicas sismológicas pueden alcanzar éxitos espectaculares, como ocurrió en el estudio geológico de la isla de Chipre efectuado a comienzos de los años 70 por geofísicos británicos. La investigación mostró que el macizo de Troodos, en Chipre, es probablemente un fragmento de corteza oceánica arrancado del fondo marino y posteriormente levantado por las fuerzas de la tectónica de placas. La trascendencia de esta investigación no es únicamente teórica, ya que explica el origen de los grandes yacimientos de cobre que

dan nombre a Chipre y que han posibilitado el auge económico de la isla desde los tiempos de los antiguos griegos hasta nuestros días.

La teoría de que las montañas del macizo de Troodos podían haber formado parte de los fondos marinos en épocas geológicas no muy antiguas surgió, de hecho, en los años 50. Un macizo es un bloque de la corteza terrestre que generalmente presenta una topografía muy accidentada y totalmente distinta de las rocas circundantes. En el caso del macizo de Troodos, hay evidencias procedentes de estudios magnéticos y geológicos de que las rocas de dichas montañas tienen un origen oceánico. La prueba definitiva de ese origen se obtuvo gracias a un reconocimiento sísmico de crucial importancia mediante el cual se determinó la disposición de las capas rocosas debajo de las montañas de Troodos. El sistema llevado a cabo consistía en el registro de las ondas sonoras emitidas por unas explosiones efectuadas en el interior de pozos llenos de agua. Estas ondas sonoras generadas por las explosiones atraviesan las distintas capas de roca a velocidades distintas produciendo unos ecos fácilmente registrables en los límites entre niveles distintos. Es, más o menos, el mismo principio utilizado para detectar submarinos con las ecosondas instaladas en buques situados en la superficie marina.

Para cartografiar las capas de la corteza terrestre es necesario situar una cadena de estaciones receptoras a distancias clave respecto a los puntos de explosión. Cuando se analizan los registros de las distintas estaciones y se confronta toda la información recibida, se puede obtener una visión bastante precisa de las formaciones rocosas subyacentes –suponiendo que las estaciones receptoras estén situadas en lugares óptimos. Desgraciadamente, la complicada morfología de las montañas de Chipre obligó a los geofísicos que se ocuparon del tema en trabajos posteriores a resituar algunas de las estaciones receptoras. Aun así, el esquema inicialmente obtenido en los años 70 apuntaba claramente que los niveles rocosos situados debajo del macizo de Troodos eran iguales que los de los fondos oceánicos.

Muchos de estos experimentos de sísmica de refracción se han llevado a cabo en el mar; por ejemplo, se ha podido comprobar que, debajo de una capa de sedimentos de unos dos kilómetros de espesor, existen otras dos capas antes de alcanzar el manto. En la capa inferior, la velocidad sísmica de las ondas de choque es de unos 6,7 km por segundo, y en la capa superior esta velocidad se aproxima a los 5,1 km por segundo. La investigación efectuada en Chipre mostró que el macizo tenía una estructura en tres capas; la más superficial de ellas –formada por lava– es relativamente reciente y está poco definida, por lo cual no puede ser considerada como una capa con identidad propia. En la primera capa "verdadera" del macizo de Troodos, la velocidad sísmica oscila entre 5,1 y 5,3 km por segundo, variación debida a la dificultad de situar las estaciones receptoras en los lugares idóneos. La segunda capa proporciona unos datos más concretos que indican una velocidad de 6,4 km por segundo. Estas cifras se aproximan enormemente a las halladas en las rocas del subsuelo oceánico comprimidas por el gran peso que ejerce el agua sobre el fondo marino y que provoca en ellas incremento relativo de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

Gracias a este tipo de estudios se puede afirmar que el macizo de Troodos es un auténtico fragmento de corteza oceánica. Además, las fuentes de recursos que pueden proporcionar los fondos marinos están prácticamente sin explorar, por lo que es muy posible que se descubran nuevos fragmentos de corteza oceánica situados en las tierras emergidas. Para ello, es imprescindible desarrollar sistemas que permitan observar directamente el fondo del mar; por el momento, existen dos técnicas que demuestran de manera muy clara cómo la moderna tecnología puede adaptarse a las necesidades de geofísicos y geólogos, encargados de encontrar nuevas técnicas que puedan conducir a la explotación económica de los fondos oceánicos.

La realización de una de esas técnicas implica el traslado de los sismógrafos a los fondos marinos en lugar de restringir las observaciones sísmicas a las tierras emergidas. Este cam-

bio es debido a que, a pesar de que los registros a partir de explosiones artificiales pueden proporcionar una gran cantidad de información sobre las capas más superficiales de la Tierra (como en el caso del macizo de Troodos), la información acerca de las capas más profundas sólo se puede obtener mediante el estudio de procesos naturales como los terremotos. A medida que los estudios sobre nuestro planeta se han ido desarrollando, ha sido posible obtener una información válida, no sólo a partir de los grandes terremotos que se detectan en todos los sismógrafos del mundo, sino también a partir de accidentes mucho menores como los microseísmos. Esto es doblemente importante ya que se producen muchos más sucesos de este tipo que explosiones artificiales con finalidades muy precisas. Actualmente, los microseísmos pueden ser estudiados en tierra firme mediante estaciones sismográficas portátiles y baratas que pueden instalarse en gran número en regiones especialmente interesantes, como por ejemplo en las inmediaciones de la Falla de San Andrés, en California. Los frecuentes microseísmos proporcionan además abundante información acerca de las condiciones de zonas concretas sin necesidad de perforar pozos ni provocar explosiones; estas investigaciones de carácter local constituyen el complemento ideal de las investigaciones acerca de estos accidentes y de las grandes estructuras sísmicas.

Sin embargo, muchas de las más interesantes estructuras de la Tierra, en relación con la tectónica de placas, están situadas debajo de los océanos. En particular, las dorsales oceánicas, presentes en la mayoría de océanos, son lugares de gran actividad. En ellas tiene lugar la formación de nueva corteza que provoca empujes laterales hacia ambos lados, ensanchando la cuenca oceánica. Este tipo de actividad puede ser estudiada utilizando métodos convencionales en lugares como Islandia, que no es otra cosa que un fragmento emergente de la Dorsal Atlántica. Pero en la mayoría de los casos, la actividad microsísmica asociada con la expansión de los fondos oceánicos sólo puede ser estudiada colocando sismógrafos "in situ" en el fondo del mar.

Existen varios grupos de científicos en el mundo interesados por este problema. En Estados Unidos, el desarrollo de nuevos instrumentos geofísicos ha fomentado la creación de una importante industria con firmas como Teledyne Geotech, que guardan en el más absoluto secreto los detalles de sus aparatos. En otros países, como la Unión Soviética, existen grupos profesionales igualmente interesados por el asunto, considerado de interés económico nacional. No obstante, las tres vías de aproximación o estrategias que se toman en consideración a la hora de estudiar los fenómenos sísmicos mediante sismógrafos sumergibles no suponen ningún secreto. En el primer caso, el sismógrafo debe ser encerrado en un recipiente estanco susceptible de ser descendido mediante un cable hasta el fondo del mar y, una vez allí, transmite la información a través del cable hasta un barco nodriza. Esta técnica, que funciona correctamente en aguas someras y tranquilas, ha sido utilizada por los sismólogos soviéticos en investigaciones efectuadas en el Mar Negro y en las regiones bálticas; pero posee el gran inconveniente de que cualquier movimiento del cable de conexión provoca vibraciones que se superponen a las de los microseísmos. Este defecto hace que dicha técnica sea inutilizable en mar abierto.

Una vía alternativa consiste en descender hasta el fondo del mar un sismógrafo dotado de un transmisor subacuático capaz de transmitir la información hasta la superficie sin necesidad de ningún enlace físico. Esta técnica requiere un equipo electrónico caro y sofisticado el cual, una vez utilizado, habrá que dejar definitivamente en el fondo. Y, además, al igual que el sistema mediante cable, es imprescindible disponer de un costoso buque oceanográfico que deberá permanecer quieto mientras duren las mediciones. Por tal razón, la vía de aproximación o estrategia más prometedora para el estudio de la microsismicidad de los fondos oceánicos consiste en enviar un sismógrafo registrador estanco, el cual, una vez haya cumplido su misión, sea capaz de ascender por sí solo hasta la superficie, donde podrá ser recuperado semanas, meses o años después de su inmersión.

Esta última técnica parece muy sencilla, pero, en realidad, supone un trabajo muy delicado. En primer lugar, la información obtenida sólo tendrá auténtico valor si se conoce con exactitud absoluta la situación geográfica del equipo sumergido. Por eso, estos equipos llevan un emisor de señales acústicas ("pinger") que se mantiene en funcionamiento durante la operación de inmersión y un breve intervalo de tiempo después de que los aparatos se hayan posado sobre el fondo. Siguiendo las señales acústicas y tomando puntos de referencia fijos proporcionados por los sistemas de navegación por satélite, puede determinarse la posición del sismógrafo con una precisión de 0,1 millas náuticas. Naturalmente, la sensibilidad del sismógrafo se vería afectada por las señales del "pinger", razón por la cual se detiene su funcionamiento antes de que las mediciones propiamente dichas den comienzo. De la misma manera que es necesario conocer la posición exacta del registrador, es imprescindible saber con exactitud el momento en que las perturbaciones sísmicas empiezan; por tal motivo, las estaciones sismográficas sumergibles deben ir equipadas con un reloj de cristal líquido que, convenientemente instalado, realizará unas marcas sobre la cinta magnética de registro a intervalos de tiempo prefijados. Una vez terminado el proceso, la estación sismográfica flotante se libera del soporte que la mantenía sumergida y alcanza la superficie del océano, en donde podrá ser localizada gracias a un receptor de radio direccional que capta ondas de radio emitidas por la estación flotante.

Estos aparatos son muy resistentes y fiables y no resultan excesivamente caros. Un solo barco oceanográfico puede repartir a lo largo de la zona de interés varias estaciones sismográficas sumergibles, las cuales podrán ir siendo recuperadas y utilizadas sucesivamente a medida que se vayan agotando sus cintas registradoras. Gracias a ensayos directos de este tipo, el hombre podrá conocer con detalle los recursos de los fondos marinos y adentrarse en sus secretos geofísicos.

Las investigaciones también deben ocuparse de analizar los tipos de rocas que constituyen los fondos oceánicos, aspecto que adquiere la mayor importancia cuando se trata de seleccionar los lugares de implantación de los sondeos de reconocimiento petrolífero. Actualmente, ya no es necesario realizar laboriosas perforaciones en las zonas de interés para obtener mediante el análisis de los materiales obtenidos una visión aproximada de las estructuras rocosas subyacentes. El nuevo método de cartografía geológica de los fondos marinos se basa en la medición de la radiactividad de las rocas subyacentes. El potasio, el uranio y el torio son elementos ligeramente radiactivos cuya proporción relativa en las distintas rocas da a éstas una "impronta" característica que permite identificarlas. El granito, por ejemplo, es particularmente rico en uranio, aunque no es lo suficientemente radiactivo para afectar a la salud de las personas que habitan en regiones graníticas.

Puede parecer muy sencillo estudiar la radiactividad de las rocas marinas mediante la utilización de un contador Geiger o escintilómetro sobre el fondo del mar. Pero, al igual que ocurre con los sismógrafos submarinos, los aspectos prácticos complican enormemente la tarea. Es cierto que un detector de rayos gamma colocado dentro de un cilindro de acero mide la radiactividad, pero si nos limitásemos a descender un aparato de estas características, muy probablemente se engancharía o se rompería contra el primer obstáculo que encontrase, con el desagradable resultado final de la pérdida del aparato. En este caso, la solución consiste en recubrir con caucho todo el cable de conexión de manera que su diámetro exterior sea igual al del cilindro de acero situado en su extremo. De este modo, se eliminan los bordes y los ángulos agudos y se consigue arrastrar todo el sistema (llamado "anguila eléctrica") a ras de fondo a velocidades de tres o cuatro nudos sin riesgo de inoportunos enganches.

Durante este tipo de reconocimientos, las partículas radiactivas que entran en el cilindro de acero hacen que las moléculas de yoduro de sodio del detector de rayos gamma emitan impulsos luminosos, los cuales a su vez son convertidos en impulsos eléctricos por un detector situado en la "anguila";

un cable eléctrico recubierto por el cable tractor es el encargado de llevar estos impulsos hasta el barco nodriza, en donde son introducidos en un computador que contabiliza el número de impulsos de las distintas magnitudes. Las magnitudes de los impulsos son características del tipo de partículas radiactivas que la "anguila" ha ido detectando a su paso, y como cada roca tiene sus partículas características, se podrá, por tanto, estimar qué tipos de rocas constituyen el subsuelo de la zona estudiada.

Para poder establecer el mapa geológico de una región es necesario efectuar varias escalas, separadas varias millas entre sí; un reconocimiento rápido puede complementarse realizando técnicas de perforación convencionales con el fin de obtener una visión más completa. En las plataformas continentales –que tienen una gran importancia para el futuro económico de muchos países– la "anguila eléctrica" ha hecho posible determinar rápida y fácilmente la composición de las rocas del subsuelo marino.

A una escala mucho mayor los métodos de reconocimiento proporcionan a los geofísicos valiosas informaciones sobre dos estructuras de la Tierra de importancia primordial, no para aspectos concretos (como puede ser el decidir dónde implantar un sondeo petrolífero), sino para obtener una visión global del mundo. Debido a la diferencia de densidad entre los distintos tipos de rocas, la atracción gravitatoria de la Tierra varía de un lugar a otro; el valor de estas variaciones es de una millonésima parte del valor absoluto de la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra. Estas pequeñas variaciones pueden ser medidas mediante unos aparatos llamados gravímetros, cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el de las balanzas de muelle o resorte. El núcleo de un gravímetro consiste en un peso adherido a un hilo elástico de cuarzo muy sensible, con un indicador que señala la desviación sufrida por las anomalías gravitacionales locales. Existen gravímetros muy sensibles y gravímetros muy resistentes susceptibles de ser instalados en un avión con el fin de estudiar el campo gravitatorio de una región. También se fabrican gravímetros portátiles que caben en una mochila y pueden ser transportados fácilmente hasta los puntos de interés, aunque este tipo de aproximación, lento y fatigoso, está quedándose anticuado debido al desarrollo de sistemas de reconocimiento gravimétrico aerotransportados. Este tipo de reconocimientos proporcionan información rápida acerca de regiones de miles de kilómetros cuadrados, tales como la North Slope Region, en Alaska, en la que existen grandes cantidades de petróleo.

Para el estudio de las anomalías magnéticas se utiliza una estrategia similar, basada en el uso de magnetómetros aerotransportados o remolcados detrás de un avión. El sistema consiste en una aguja imantada atada a un fino muelle, la cual se desvía según las modificaciones que los distintos tipos de rocas provocan en el campo magnético terrestre. Los reconocimientos magnéticos de la corteza oceánica han resultado de gran importancia para el desarrollo de la teoría de la tectónica de placas y la expansión de los fondos oceánicos, tal como se verá en el próximo capítulo. El estudio detallado del magnetismo de las rocas sigue aún el método tradicional consistente en obtener muestras de rocas para examinarlas en el laboratorio. En cambio, los reconocimientos magnéticos aerotransportados tienen la gran ventaja de que revelan nítidamente la presencia de rocas ricas en menas metálicas, como por ejemplo los grandes campos auríferos de la Australia interior. Además, también pueden ser utilizados en regiones particularmente interesantes de los fondos oceánicos, como en el caso de las investigaciones acerca del Rockall Bank efectuadas a finales de los años 60 e inicios de los 70.

Rockall se parece bastante al caso de Chipre, pero al revés. Mientras el Macizo de Troodos está formado por corteza oceánica levantada por encima del nivel del mar, las rocas de los fondos que rodean Rockall presentan características propias de las que habitualmente constituyen las masas continentales. Un reconocimiento magnético del Rockall Bank puso de manifiesto la existencia de un extenso cinturón de anomalías magnéticas alrededor de la isla idénticas a las que suelen ir asociadas con las coladas de lava. Esta distribución

sugiere que el centro del Rockall Bank es un volcán extinguido, y, además, los perfiles de sísmica de reflexión indican que, en lugar de una estructura en dos capas propia de la corteza oceánica, el grosor de las rocas que rodean Rockall es típico de las masas continentales. Tras realizar estos reconocimientos, los geofísicos obtuvieron muestras de las rocas de los fondos de Rockall, con las que pudieron contrastar la teoría de que tanto la isla como el banco podrían ser un fragmento de corteza continental que se quedó atrás a medida que el Océano Atlántico se iba expandiendo.

Casi todas las rocas de los subsuelos oceánicos son relativamente jóvenes, geológicamente hablando, ya que se han formado durante las etapas de abertura de los océanos. En cambio, algunas muestras del Rockall Bank tienen 1.000 millones de años de antigüedad, o sea que son cinco veces más viejas que la mayor parte de rocas que componen la corteza continental. En muy pocos lugares de la Tierra (principalmente en Canadá) se hallan rocas de edad comparable. Esta edad ha sido establecida mediante un método muy fiable, el del argón. El sistema consiste en el escape de argón mediante la desintegración de potasio radiactivo. Este argón es, a su vez, atrapado en la composición cristalina de las rocas en unas cantidades que, medidas, permiten calcular cuánto tiempo ha transcurrido entre el momento en que la roca aún estaba fundida y la actualidad, es decir, su edad geoquímica. Este método ha demostrado, sin lugar a dudas, que Rockall no es una región de fondos oceánicos típicos.

Parece ser que cuando un continente empieza a romperse bajo la influencia de cualesquiera que sean las fuerzas motrices de la deriva continental, la rotura puede conllevar anomalías. Por ejemplo, una pequeña parte de la corteza continental puede quedar separada de la masa principal y ser rodeada posteriormente por las rocas ígneas que se forman en los fondos oceánicos. Además del Rockall Bank, sobre el cual se mantiene la hipótesis de que podría ser un fragmento desgajado del este del Canadá, existen otros dos microcontinentes que son Madagascar y el Banco de las Seychelles, en el Océano Índico. Este tipo de investigaciones confirman el desplazamiento de los continentes mientras tiene lugar la abertura de los fondos oceánicos debido a los procesos de la tectónica de placas. Todo ello está desempeñando un papel primordial en la construcción de una nueva imagen dinámica de la Tierra. Pero la abolición de viejos dogmas geofísicos en los años 60, que tanto favoreció la aceptación ulterior del concepto de deriva continental, fue debida esencialmente a los resultados de los estudios magnéticos de los fondos oceánicos. El gran cambio de pensamiento se produjo cuando estos estudios demostraron que los fondos oceánicos se expandían hacia los lados a partir de las dorsales submarinas empujando a los continentes, por lo que éstos no sólo *pueden* sino que *deben* moverse.

V. EXPANSIÓN DE LOS FONDOS OCEÁNICOS, DERIVA CONTINENTAL Y TECTÓNICA DE PLACAS

Durante la década de los años 50 se efectuaron estudios sísmicos que demostraron que la corteza terrestre es mucho más delgada en las cuencas oceánicas que debajo de los continentes. El manto se encuentra debajo de los fondos oceánicos a tan sólo 5 ó 7 kilómetros de profundidad, mientras que, en promedio, la corteza continental tiene un espesor de unos 34 km, pudiendo alcanzar en algunos lugares los 80 y hasta los 90 km de espesor. El otro gran descubrimiento –alrededor de la misma década– acerca de los fondos oceánicos, fue la manifestación de su relieve, tan irregular como en las tierras emergidas; en los fondos existen montañas, cañones y cordilleras sumergidos. Las cordilleras o dorsales en el centro del Océano Atlántico se alzan unos 3 km por encima de las llanuras abisales circundantes; dichas cordilleras, junto a otros elementos topográficos, muestran que los fondos oceánicos son regiones geológicamente activas. La Dorsal del Atlántico Norte fue la primera en ser estudiada con detalle. Además de ser la mejor conocida, es también, quizás por suerte para el desarrollo de la geofísica en los años 60, la de estructura más simple en todo el mundo.

El eje de esta dorsal está ocupado por un valle de rift activo en el que abunda la actividad volcánica. En 1960, el profesor Harry Hess, de la Universidad de Princeton, explicó esta y otras estructuras submarinas recién descubiertas a partir del primer modelo de la expansión de los fondos oceánicos, el

cual recuperaba la vieja idea de la deriva continental. Según dicha teoría, las dorsales oceánicas se forman a partir de unas corrientes de convección ascendentes que se producen en los materiales fluidos del manto terrestre. Estas corrientes transportan material del manto hacia la superficie de la dorsal, la cual se expande lateralmente provocando la separación de los continentes y dando lugar a la formación de nuevas cuencas oceánicas. Esta idea profundiza en el concepto wegeneriano de la deriva continental, estudiando la fuerza motriz de dicha deriva. Pero también ha planteado nuevos interrogantes.

La primera cuestión consiste en conocer qué ocurre con la nueva corteza oceánica que se forma en los centros de expansión. Según las dataciones acerca del momento en que se produjo la abertura inicial del Océano Atlántico, la velocidad de expansión en ese océano es de aproximadamente un centímetro por año hacia ambos lados de la dorsal medio-atlántica; es decir, la anchura del Atlántico habría aumentado dos centímetros cada año. Esta tasa de formación de nueva corteza habría dado lugar a la actual extensión de la cuenca atlántica en tan sólo 200 millones de años, o sea, en un período que sólo representa menos del 5 % de la edad de la Tierra. Sólo hay dos posibles explicaciones a este hecho. O bien la Tierra se ha expandido dos tercios durante ese corto intervalo de tiempo, o bien existen lugares en los que la corteza oceánica es destruida con la misma rapidez con que está siendo creada en la dorsal medio-atlántica.

Parece bastante improbable que haya tenido lugar una expansión tan rápida sin que se produjeran consecuencias espectaculares. La forma de los continentes actuales hace suponer su existencia desde su formación sobre un planeta de un tamaño parecido al actual. Esto puede ser visualizado de una manera bastante simple recortando los continentes y haciéndolos coincidir para ver hasta qué punto encajan unos con otros. El resultado de este experimento muestra que los contornos de los continentes situados en los lados opuestos de los océanos encajan bastante bien y, en consecuencia, parece lógico pensar que, incluso antes de que se rompiesen los supercontinentes previamente existentes, la Tierra tenía aproximadamente el mismo tamaño que tiene hoy en día.

Esta constatación deja abierta la posibilidad de la destrucción de la corteza oceánica. Hess sugirió que los grandes sistemas de fosas situados en los bordes de algunos océanos –especialmente en el Pacífico occidental– serían los lugares en los que se produciría la extinción de la corteza oceánica; las fosas coincidirían con zonas de convección en las que existen movimientos descendentes de material hacia el manto en donde dichos materiales serían refundidos para volver a iniciar el ciclo completo. Ésta es aún la versión más actual del proceso considerado fundamental de la expansión de los fondos oceánicos. Existen, además, evidencias circunstanciales que refuerzan esta teoría. El grosor de los sedimentos en los fondos oceánicos es relativamente pequeño y esto demuestra que dichos sedimentos están ahí desde hace poco tiempo; nunca se han encontrado en los fondos oceánicos rocas extremadamente antiguas, excepto en algunas situaciones excepcionales como el Rockall Bank, el cual por otra parte es utilizado actualmente para corroborar la teoría acerca de la deriva continental. Pero el hecho más interesante es, quizás, la gran concentración de actividad sísmica existente a lo largo de las dorsales y de las fosas, es decir –y según Hess–, precisamente en los lugares en los que la expansión y la consunción de los fondos oceánicos es más activa (véase la fig. 4). No obstante, y a pesar de las evidencias, no fue fácil convencer a la comunidad geofísica de la veracidad de la expansión de los fondos oceánicos y de la deriva continental. La prueba magnética crucial que evidenció estos hechos no fue presentada hasta 1963, y aún así, no se le concedió de inmediato el auténtico valor que tenía en relación con las ideas de Hess acerca de la expansión de los fondos oceánicos.

Uno de los dos o tres primeros científicos en sostener el moderno concepto de deriva continental, transformado en tectónicas de placas, fue el Dr. Dan McKenzie de la Universidad de Cambridge. Su interés por este tipo de cuestiones surgió a raíz de una conferencia pronunciada por Hess en Cam-

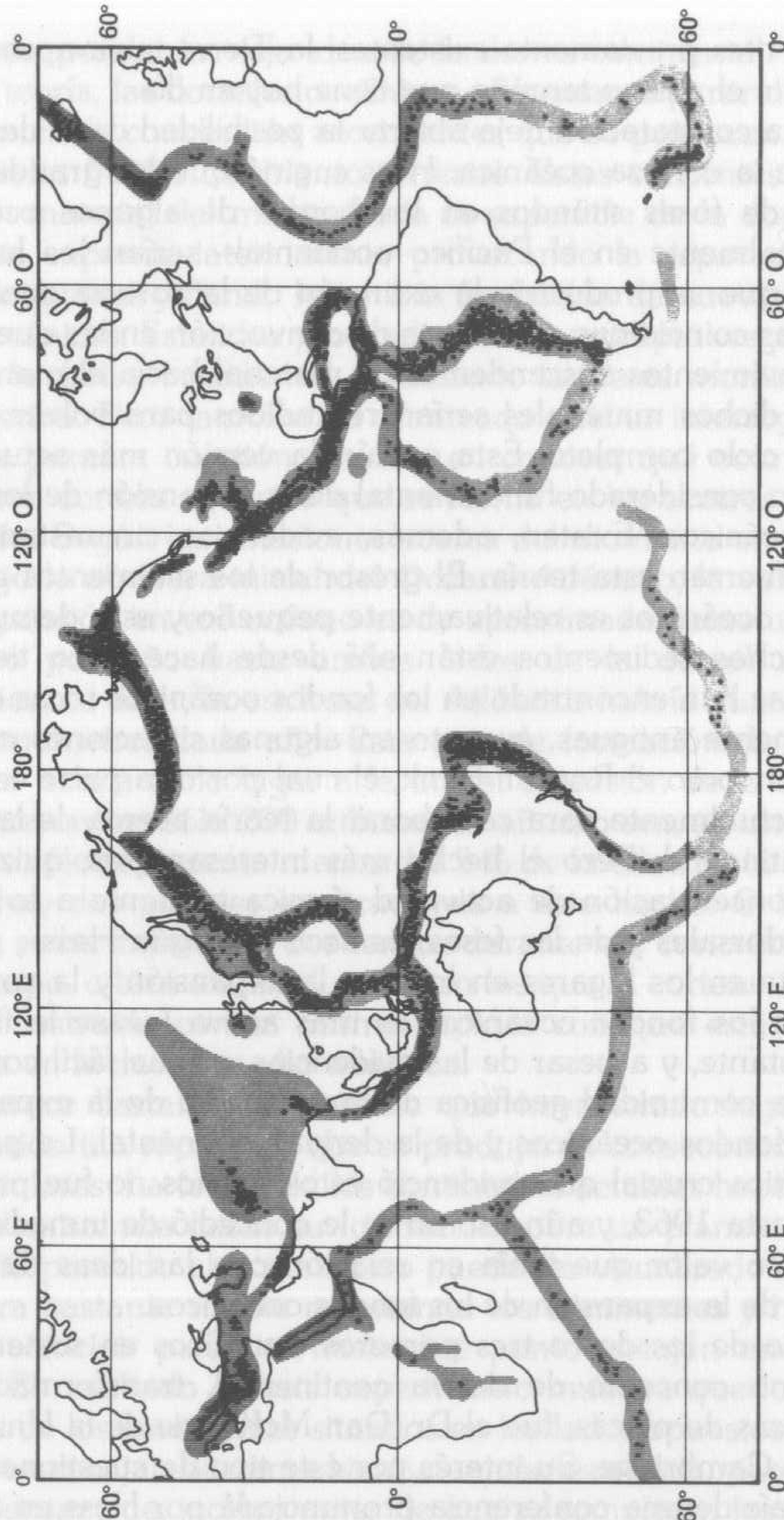


Fig. 4 Distribución mundial de las regiones sísmicas.

bridge en 1962 cuando McKenzie era aún estudiante. Esta conferencia motivó también a otros científicos el estudio de dichas teorías; como ocurrió con Fred Vine y D. H. Matthews, miembros del Departamento de Geodesia y Geofísica de Cambridge que, un año más tarde, explicaron la relación entre las anomalías magnéticas –bandas magnéticas de los fondos oceánicos– y las dorsales oceánicas. No se sabe con certeza quién fue el primero en darse cuenta de la posibilidad de relacionar las ideas de Hess sobre la expansión de los fondos oceánicos con la existencia de esas bandas magnéticas (aunque McKenzie recuerda una conversación con Vine durante esa época acerca de esta posibilidad). Actualmente, la relación parece fuera de toda duda; pero no hay que olvidar ni la fuerte oposición hacia la deriva continental que aún existía a comienzos de los años 60 ni la aversión que algunos geofísicos sentían respecto al hecho de llegar a ser considerados como émulos de Wegener. Puede parecer que la transformación sufrida por las ciencias de la Tierra en los años 60 fue una revolución, pero durante los primeros años de esa década se progresó muy lentamente a pesar del número cada vez mayor de datos y evidencias que se iban acumulando.

Las bandas magnéticas fueron observadas por primera vez en el noroeste del Pacífico durante una operación de reconocimiento magnético de los fondos oceánicos desde embarcaciones. Las bandas van de sur a norte y destacan debido a que la magnetización de las rocas de una banda tiene un sentido contrario al de la magnetización de las rocas de las bandas inmediatamente adyacentes; en algunas bandas, el sentido de la magnetización es el mismo que el del campo magnético actual, mientras que en otras el sentido está invertido. Si se acepta que los fondos oceánicos se han formado a partir de la solidificación de rocas fundidas procedentes del manto, puede admitirse también que las partículas magnéticas existentes en dicho material fundido se orienten según el campo magnético terrestre existente en el momento de la solidificación; en consecuencia, estas rocas presentarán un magnetismo fósil. El hecho de que algunas rocas tengan un

magnetismo opuesto al del actual campo magnético terrestre puede ser interpretado de dos maneras: o bien se han invertido respecto a la posición que tenían en el momento de su formación, o bien el campo magnético terrestre ha cambiado en repetidas ocasiones. La primera posibilidad es tan improbable que sólo puede aprobarse la segunda alternativa: el campo magnético terrestre se ha invertido repetidamente a lo largo de la historia geológica de la Tierra. Y eso quiere decir también que las sucesivas bandas del fondo oceánico se han formado en épocas diferentes, hecho que verifica la hipótesis de la expansión de los fondos oceánicos.

Vale la pena destacar todo lo que ese descubrimiento significa para la teoría del magnetismo terrestre. Si se suprime la falsa teoría de que las rocas de la corteza oceánica han sido giradas hasta dar lugar a las bandas magnéticas actuales, se debe admitir la improbable, pero cierta, versión de que el campo magnético terrestre cambia de sentido bastante a menudo en términos geológicos; el Polo Norte pasa a ocupar la posición del Polo Sur y viceversa. Estudios más recientes sobre el magnetismo terrestre han demostrado que durante este proceso de inversión, el campo magnético se extingue para resurgir posteriormente con el sentido cambiado (eso provocaría que las brújulas marcasen el sur en lugar del norte). Pero los hechos pueden complicarse; hay veces en las que disminuye la intensidad del campo y posteriormente vuelve a aumentar en *la misma* dirección que tenía inicialmente. Este proceso tiene una duración de unos cuantos miles de años –un instante, en relación con la escala de los tiempos geológicos–; el período de tiempo que transcurre entre inversiones sucesivas puede oscilar entre 100.000 años y 50 millones de años. Las inversiones parecen haber sido bastante frecuentes durante los últimos 70 millones de años, produciéndose una o dos veces cada millón de años. Puesto que el campo magnético terrestre parece estar debilitándose desde hace 150 años (a una velocidad tal que, de mantenerse, lo reducirá a cero dentro de 2.000 años), es probable que nuestra actual civilización viva una de esas inversiones.

Por tanto, el concepto de la expansión de los fondos oceánicos nos muestra el proceso de creación de nueva corteza en las dorsales oceánicas que va siendo imantada por el campo magnético terrestre a medida que va formándose. Mientras la corteza se expande hacia los lados de las dorsales, el magnetismo terrestre va sufriendo inversiones que quedarán registradas en el campo magnético fosilizado en las rocas. Las rocas más jóvenes, que son las más próximas al eje de la dorsal, se magnetizarán según el campo actual: para localizar etapas geológicas anteriores es necesario alejarse progresivamente del eje de la dorsal; allí la corteza oceánica ha actuado como una especie de cinta magnética que permite estudiar las inversiones del magnetismo terrestre. Una consecuencia lógica de esta teoría es el hecho de que la distribución de las anomalías magnéticas a ambos lados de la dorsal debe ser simétrica ya que la nueva corteza formada se ha expandido hacia ambos lados; y esto es exactamente lo que se ha hallado en la realidad (véase la fig. 5). En 1963 aún se discutía si el campo magnético de la Tierra se había invertido o no y, además, los defensores de las nuevas ideas de la expansión de los fondos oceánicos y del registro magnético no habían podido establecer todavía una cronología definitiva que permitiese datar las inversiones.

La realización de nuevos análisis magnéticos y el perfeccionamiento de la técnica del potasio-argón ayudaron al avance de estos estudios. El método del potasio-argón sirve para datar las lavas procedentes de la expansión de los fondos oceánicos. La escala de las inversiones geomagnéticas ocurridas durante los 3,5 millones de años últimos no se terminó hasta 1966; esa misma escala ha sido utilizada en la figura 5 para indicar la cronología de los procesos de expansión de los fondos oceánicos. Desde ese año la escala de tiempos geológicos ha sido corregida y ampliada en relación a épocas más antiguas gracias al estudio fundamentalmente de rocas aflorantes en los continentes; hay que tener presente que, en los continentes, las rocas también registran el magnetismo existente en el momento de su formación. La constata-

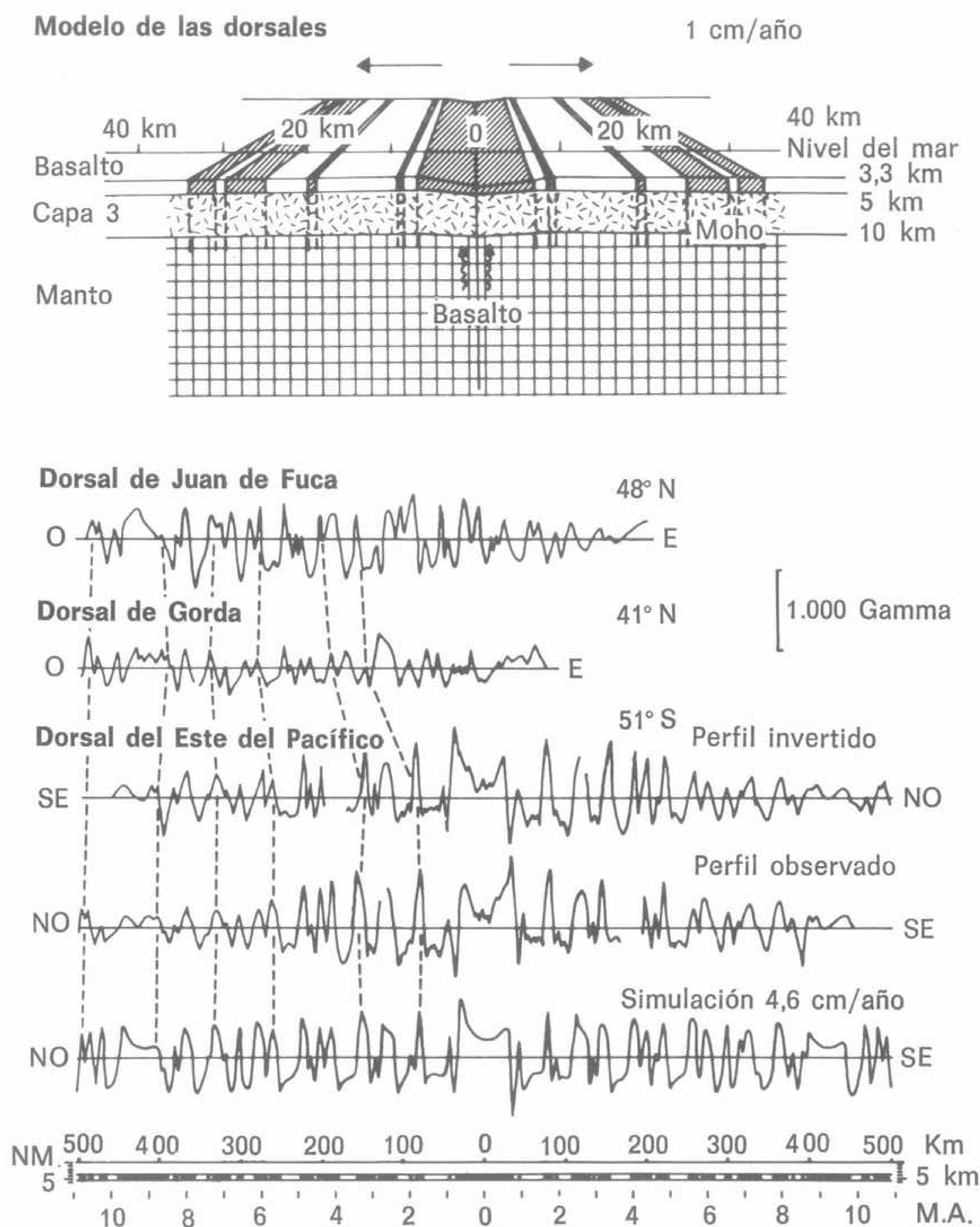


Fig. 5. Modelo de cordillera de expansión: las rayas claras y oscuras indican la magnetización opuesta. (De *Understanding the Earth*, reproducido por cortesía de Artemis Press Ltd).

ción de que en tierra firme existían las mismas inversiones magnéticas reflejadas en las bandas de los fondos oceánicos es la prueba fehaciente de la capacidad de la Tierra para alternar (y, además, con relativa rapidez) la posición de sus polos magnéticos. El cómo y el porqué de esas inversiones es aún un problema no resuelto, pero su existencia es considerada actualmente una prueba indiscutible de la expansión de los fondos oceánicos. ¿De qué otra manera pueden haberse formado las bandas magnéticas simétricas de los fondos oceánicos?

El aspecto más remarcable en el desarrollo de este proceso no fue la aceptación generalizada del concepto de deriva continental hacia mediados de los 60, sino la restauración de las antiguas ideas prácticamente en los mismos términos en que las planteó Wegener. El cambio de la opinión geofísica internacional empezó a producirse en un simposio sobre la deriva continental patrocinado por la Royal Society en 1964. En el transcurso del mismo, Sir Edward Bullard –por ese entonces director del Departamento de Geodesia y Geofísica de Cambridge– presentó un mapa que mostraba hasta qué punto pueden encajar los continentes situados a uno y otro lado del Atlántico (fig. 6). Esta reconstrucción, ampliamente difundida, fue la primera figura elaborada mediante computadores electrónicos, razón por la cual fue aceptada por casi todos los científicos, mientras que otras reconstrucciones anteriores casi idénticas, pero hechas a mano, no habían sido admitidas. Es un rompecabezas curioso.

Si se siguen las curvas de nivel en cualquier atlas, las líneas de costa de los continentes se desplazarían sensiblemente si el nivel del mar estuviese algo más arriba o algo más abajo de lo que está en la actualidad. Estas oscilaciones del nivel del mar se han producido con frecuencia en relación con variaciones de la cantidad total de agua retenida en los casquetes polares y, quizás, en relación con otros procesos geofísicos; por tal razón, no es correcto reconstruir los antiguos supercontinentes limitándose a hacer coincidir las líneas de costa de los continentes actuales. En realidad, el verdadero



Fig. 6. Ajuste de los continentes antes que se "abriera" el Atlántico, de Bullard.

límite de un continente no es la línea de la costa sino el borde de la plataforma continental. Aguas afuera del borde de la plataforma continental, la profundidad de los mares y océanos aumenta bruscamente, llegando a ensancharse algunos kilómetros al pie del llamado talud continental y avanzando progresivamente hacia las llanuras abisales y las fosas oceánicas. Existen argumentos que permiten afirmar que las líneas de rotura de los antiguos supercontinentes están representadas en la actualidad por el borde de la plataforma continental. Desplazando la línea de la costa hasta la parte media o hasta la cuarta parte (es decir, aproximadamente hasta 1 ó 2 km de profundidad) de los taludes continentales se obtiene un nuevo contorno según el cual los continentes también encajan bastante bien. Este hecho ya se conocía en 1958, año en que se hicieron encajar Sudamérica y África con unos resultados muy parecidos a los de la figura 6. Sin embargo, esta reconstrucción se hizo de manera aproximada, procurando cerrar al máximo los espacios vacíos entre ambos continentes y sólo fue ampliamente aceptada al rehacerse con la ayuda de un computador.

En 1964, los computadores eran aún una especie de juguete nuevo para la mayoría de científicos y suponemos que el respeto que merecían fue lo que condujo a la comunidad geofísica a aceptar la reconstrucción presentada por Bullard y sus colegas; en cambio, se habían rechazado otras reconstrucciones anteriores que actualmente son igual de convincentes. Sin embargo, es probable que Bullard estuviese en el sitio justo en el momento oportuno. En 1964 se discutieron las nuevas ideas acerca de la expansión de los fondos oceánicos y de las bandas magnéticas oceánicas; el solo hecho de que fuese la Royal Society la que patrocinase un simposio sobre la deriva continental muestra hasta qué punto había cambiado la opinión del *establishment* en unos pocos años. La reconstrucción computarizada de la antigua distribución de los continentes constituyó el catalizador en torno al cual se aglutinó un número cada vez mayor de opiniones favorables a la, en otros tiempos, herética idea de la deriva continental.

En lo que restaba de la década de los 60 se fueron acumulando datos que confirmaban la veracidad de la deriva continental y de la expansión de los fondos oceánicos. El Deep-Sea Drilling Project JOIDES (siglas de "Joint Oceanographic Institutions Deep Earth Sampling") supuso uno de los hitos más importantes. Una serie de perforaciones a lo largo de la Dorsal Medio-Atlántica proporcionó muestras de rocas que pudieron ser datadas con precisión mediante las nuevas técnicas geofísicas; las dataciones demostraron que la expansión es simétrica respecto a los ejes de la dorsal, y que se había estado produciendo sin interrupción durante todo el Cenozoico a una velocidad casi uniforme de 2 cm por año, exactamente el mismo valor obtenido a partir del estudio de las bandas magnéticas. Gracias a ulteriores estudios realizados dentro del marco de ese mismo proyecto y a la acumulación de nuevas evidencias geológicas, actualmente es posible conocer con precisión el momento en que se rompió el antiguo supercontinente Gondwana y comenzó la abertura de los actuales océanos.

Actualmente, hay un océano embrionario que se está abriendo en el Mar Rojo, tal como ya hemos explicado anteriormente; la abertura del Océano Ártico y la parte más septentrional del Océano Atlántico se ha producido a lo largo de los últimos 100 millones de años (durante el Cretácico superior y el Terciario), después de la abertura del Atlántico Sur, que se inició en el Cretácico inferior, hace más de 100 millones de años. Todos estos estudios muestran que los dos términos aplicables al proceso ("deriva continental" y "expansión de los fondos oceánicos") son esencialmente incorrectos ya que los cambios que modifican la faz de la Tierra afectan tanto a los continentes como a los océanos. La incorporación de ambos procesos en una sola teoría unificada, la tectónica de placas, ha supuesto el último episodio de la revolución de las ciencias de la Tierra y ha significado el comienzo de una nueva concepción del mundo. La revolución empezó al darse cuenta los científicos de la extraordinaria deformación en las dorsales y en las fosas oceánicas, lugares que coinciden con

los límites de las ahora denominadas "placas" de la corteza terrestre. La revolución puede considerarse completa desde el momento en que se comprobó que, a pesar de lo que sucedía en los límites entre placas, en el interior de las mismas hay muy poca o ninguna deformación y que las placas se comportan como islas sólidas que se desplazan relativamente y sin cesar las unas respecto a las otras.

El concepto está tan asumido hoy en día que es difícil darse cuenta de la tremenda novedad que significó la teoría de la tectónica de placas hace tan sólo una década. Además, el término no fue utilizado en un artículo científico hasta 1967, cuando Dan McKenzie y R. L. Parker publicaron un texto que ha devenido clásico en la revista *Nature*. En él, los autores explican la existencia de algunas estructuras del Pacífico Norte debida a los movimientos de placas rígidas que se desplazan sobre la superficie de una esfera. Ambos autores trabajaban en aquel tiempo en California, a pesar de que McKenzie pronto volvió a Cambridge, donde su tarea de promotor del nuevo concepto dio frutos tan rápidamente que, según sus propias palabras, «a finales de 1968 la teoría podía considerarse acabada», al menos en sus líneas maestras. Y a partir de ese momento la tectónica de placas empezó a ser aplicada para explicar estructuras geológicas especiales y para resolver problemas más acucientes, tales como la necesidad de encontrar nuevos recursos energéticos y minerales.

El artículo clásico de McKenzie y Parker del año 1967 agrupaba todas las nuevas ideas de la geofísica en una sola y coherente teoría. Mostraron que los accidentes geofísicos podían ser explicados mediante la existencia de placas rígidas móviles y sísmicamente tranquilas interactuando entre sí en sus bordes; estos bordes estarían precisamente en las regiones del globo sísmicamente activas. Ese mismo año aplicaron la nueva teoría para explicar la estructura del Pacífico Norte, demostrando así que ese concepto podía servir para explicar la estructura de más de la cuarta parte de la superficie de la Tierra. En 1968, el Dr. Jason Morgan, de la Universidad de Princeton (quien había estado trabajando sobre estas nuevas

ideas de manera independiente), elaboró un mapamundi en el que las áreas sísmicamente tranquilas estaban representadas bajo la forma de seis placas principales (en esencia, las regiones tranquilas de la figura 4) y doce subplacas. En ese momento, la teoría de la tectónica de placas ya estaba completada en los puntos fundamentales. A pesar de algunas semejanzas superficiales, difiere sensiblemente de la vieja idea de la deriva continental; ya no se asocian los movimientos de los continentes encima de la corteza oceánica con los de los icebergs en la superficie del mar sino que se relacionan con las interacciones entre unas pocas grandes placas que soportan a los continentes.

En consecuencia, las regiones del mundo con mayor actividad geológica se encuentran actualmente en los límites entre dos o más placas distintas. Hay tres tipos de contactos entre placas: los contactos constructivos se hallan en las dorsales oceánicas, donde se está creando nueva corteza oceánica que empuja, alejándolas entre sí, a las dos placas hacia los lados. Los contactos o márgenes destructivos están situados en las fosas oceánicas –que son regiones de choque entre placas–, en donde una placa se hunde debajo de la otra formando ángulos de hasta 45°, que llegan a alcanzar el manto. Finalmente, en los contactos conservativos ni se crea ni se destruye corteza sino que las placas se limitan a deslizarse la una respecto a la otra.

Aunque las placas individuales pueden estar formadas por corteza continental u oceánica, o por ambos tipos de corteza, los márgenes constructivos y destructivos sólo existen en asociación con corteza oceánica. Por lo que hasta ahora se conoce, ni se crea ni se destruye material continental como consecuencia de la tectónica de placas. Esta observación es muy importante ya que está suficientemente demostrado que únicamente se crea corteza oceánica, la cual es mucho más delgada que la corteza continental. ¿Pero, qué sucedería si una masa continental fuese empujada hasta una fosa oceánica en la que se produjese la destrucción de una placa? Aunque puede hundirse hasta cierto punto, la baja densidad de

los materiales que la componen (sólo unos 2,85 g/cm^3 en comparación con unos 3,35 g/cm^3 en el manto) impide que se produzca la absorción profunda del material continental, por lo que el margen destructivo deja rápidamente de ser activo. Por tal razón, la distribución de la actividad tectónica en la Tierra ha ido variando a lo largo del tiempo. Como ya se ha dicho en anteriores capítulos, es muy improbable que el tamaño de nuestro planeta esté cambiando en la actualidad, o que lo haya hecho en los últimos cientos de millones de años. En consecuencia, la velocidad con que se crea nueva corteza oceánica en las dorsales de expansión debe ser la misma con que se destruye en las fosas oceánicas; si una fosa oceánica es bloqueada por una masa continental, en compensación en algún lugar del mundo debe ralentizarse o detenerse un proceso de expansión. Además, cualquier cambio en la velocidad o en la dirección de desplazamiento de una placa debe ser compensado por un movimiento equivalente pero de sentido contrario en algún lugar del mundo. Una consecuencia de este proceso es la detención hace relativamente poco (en términos geológicos) de la actividad expansiva en varios lugares de la Tierra debido a la abertura de un nuevo océano en el Mar Rojo. La América del Norte occidental ha rebasado, por ejemplo, el extremo Norte de la Dorsal Pacífica y ha provocado la extinción de la actividad expansiva en esa región, a pesar de que aún se puede encontrar en ella una actividad tectónica residual. Éste es un ejemplo especialmente interesante que ha dado lugar a la formación de la Falla de San Andrés en California; esa falla se produjo mediante la penetración en la masa continental norteamericana del sistema expansivo de la Dorsal del Pacífico Sur; en el capítulo 7 se tratan los efectos derivados de esa situación, juntamente con el proceso, asimismo interesante, existente en la Falla del Great Glen, en Escocia, en un lugar en el que antes existía un margen conservativo.

Para estudiar correctamente el proceso de la tectónica de placas es necesario reconocer el hecho de que estas placas se desplazan, no sobre una superficie plana, sino sobre la super-

ficie aproximadamente esférica de la Tierra. Para mayores precisiones acerca de la teoría de la tectónica de placas puede remitirse a las obras citadas en la bibliografía de este libro. Sin embargo, lo realmente significativo es que la utilización de los cálculos esféricos adecuados permite explicar los procesos de contactos entre placas mejor que cualquier modelo simplificado basado en la asunción de una superficie plana. En general, las limitaciones impuestas por la geometría de dichos contactos son menos restrictivas que las leyes físicas que rigen la actividad de la tectónica de placas en la Tierra. Por ejemplo, no hay ninguna razón de índole geométrica que explique por qué la expansión es simétrica a ambos lados de un contacto constructivo; podría producirse una expansión únicamente hacia un lado de la dorsal, o que las velocidades de expansión fuesen distintas a uno y otro lados. No obstante, esto no responde a lo que ocurre en la realidad.

Hay algunas situaciones extremadamente complicadas, como las que existen en las zonas de contacto entre tres placas distintas o en los lugares en los que una dorsal expansiva choca en ángulo recto con una fosa destructiva. Una placa puede tener formas muy diferentes y sus bordes pueden ser, según las zonas, constructivos, destructivos o conservativos. La placa africana está limitada al oeste por la Dorsal Atlántica y al este por la Dorsal del Océano Índico, por lo que crece hacia ambos lugares. La placa del Pacífico Norte, la mayor del mundo, ya no crece en su borde este –un borde conservativo que se extiende a lo largo de las costas de Norteamérica– y está siendo consumida en las fosas oceánicas del Pacífico occidental, por lo que su tamaño tiende a disminuir. Estos hechos reflejan una tendencia hacia el mantenimiento en cada época de la misma cantidad de corteza continental. Puesto que en la placa del Pacífico no hay corteza continental, es posible que su destrucción progresiva provoque la colisión de Norteamérica y Eurasia, las cuales formarían entonces un nuevo supercontinente. Cuando eso ocurra, es posible que el Atlántico se haya ensanchado hasta alcanzar las dimensiones del Pacífico actual, y que, tras la colisión, se produzca un

nuevo proceso de expansión que rompa el supercontinente, reiniciándose así todo el proceso.

Los procesos de colisión, reajuste y rotura parecen haber ocurrido varias veces a lo largo de la historia de la Tierra. Al chocar los continentes, se levantan cordilleras cuyo estudio permite conocer los procesos tectónicos asociados con los antiguos movimientos de deriva de los continentes; el Himalaya se formó como consecuencia del choque entre la India, que se desplazaba hacia el norte, y el continente eurasiático, hace relativamente poco tiempo. También se forman cordilleras en los márgenes de los continentes afectados por procesos tectónicos; a medida que Sudamérica se va desplazando hacia el este, se va produciendo un doble proceso de consunción de corteza oceánica en las fosas del Pacífico oriental y de levantamiento progresivo dè la Cordillera Andina. Es un caso bastante parecido al de las montañas de Chipre, que están siendo empujadas hacia arriba a medida que los continentes africano y europeo se van aproximando. La estructura geológica y este proceso actualmente en funcionamiento en Chipre demuestran la persistencia de los procesos tectónicos sobre la superficie de la Tierra. Las montañas de Terranova están constituidas exactamente por el mismo tipo de rocas que forman las montañas de Chipre, además de contener importantes yacimientos de cobre, lo que hace suponer un similar proceso de formación. Esas montañas canadienses tienen 500 millones de años de antigüedad, mientras que la rotura del supercontinente Pangea (formado por Laurasia en el norte y Gondwana en el sur) se inició aproximadamente en el mismo momento en que comenzó la expansión de los fondos del actual Océano Atlántico, hace unos 200 millones de años. Por lo tanto, debe admitirse que mucho antes de que el Pangea comenzase a abrirse ya se habían producido procesos tectónicos enormemente parecidos a los que actualmente están ocurriendo en el Mediterráneo. Las rocas de las montañas de Terranova constituían en aquellos tiempos el fondo del mar y fueron levantadas a medida que se iba acentuando la colisión entre dos continentes.

Por tanto, no es del todo cierto decir que la cantidad total de corteza continental existente en la superficie de la Tierra se ha mantenido constante. En ocasiones, se han formado nuevas montañas debido a plegamientos y alzamientos de rocas sedimentarias, tal como ocurre actualmente en los Andes, situados en la parte frontal de una placa que se está desplazando hacia el oeste; en otras ocasiones, las colisiones entre placas que transportan un continente provocan un encierro de bloques de corteza oceánica que se incorporarán así a unas masas esencialmente continentales. En este tipo de colisiones puede producirse un cierto grado de destrucción de corteza continental; por ejemplo, cuando la India se desplazaba hacia el norte, en dirección a Eurasia, existía un proceso de subdivisión a través del cual la corteza del bloque índico se hundía debajo del Himalaya provocando precisamente el alzamiento de dicha cordillera. Sin embargo, la mayor parte de zonas de subducción provocan la destrucción de corteza oceánica y, por lo tanto, producen una cantidad muy pequeña de nuevo material que se incorpora a los continentes, incluso considerando períodos de millones de años. No obstante, en algunos lugares del mundo la actividad tectónica se está produciendo a una velocidad apreciable a escala humana; por ejemplo, al oeste del Estrecho de Gibraltar, en el Atlántico, en el lugar en que chocan las partes sumergidas de las placas eurasiática y africana, existe una región del fondo oceánico extremadamente confusa cuya topografía cambia en el intervalo de unos pocos años, con indicios además de que el fondo se está levantando a consecuencia de los empujes opuestos de las dos placas. Las especiales características que forman este proceso son extremadamente similares a las acontecidas en Terranova, por lo que podría aventurarse la hipótesis de la formación, en este lugar, de un nuevo "Chipre".

A pesar de éstas y otras evidencias, algunos geofísicos aún opinan que la rotura del Pangea ha sido un acontecimiento único en la historia de la Tierra y que aquel supercontinente no era en modo alguno el resultado de movimientos de deriva y colisiones continentales. Incluso hay geofísicos que no aceptan en absoluto la teoría de la tectónica de placas y que aún están convencidos de que los continentes no se han movido. Pero eso no es de extrañar, ya que aquellos geofísicos que han sido persuadidos –en contra de sus más firmes principios anteriores– de la autenticidad de la deriva continental, al menos durante los últimos 200 millones de años, tienden a aferrarse todo lo posible a sus antiguas ideas y creencias, negando, en consecuencia, que los continentes se hayan movido antes de la rotura del Pangea. Ahora bien, si la rotura del Pangea ha sido un evento único, ¿cómo puede explicarse que en los fondos del Pacífico se hallen rocas tan viejas como las de los más antiguos continentes? La constatación de que incluso el enorme Océano Pacífico se ha formado unos pocos cientos de millones de años atrás puede ser explicada si se considera que la actividad tectónica es un proceso continuo que ha existido desde que en la Tierra se produjo la primera diferenciación entre océanos y continentes, o tal vez antes.

Aún no se puede aplicar satisfactoriamente la teoría de la tectónica de placas a los períodos anteriores al Pangea. De momento, los yacimientos de cobre en Terranova permiten afirmar que hace 500 millones de años ya tenían lugar procesos tectónicos semejantes a los actuales, pero aún no se conoce lo bastante acerca de esos antiguos accidentes tectónicos como para predecir con certeza en qué lugares pueden existir yacimientos de cobre del mismo tipo. Pero es muy posible que en el futuro nuestros conocimientos acerca de la actividad tectónica actual y del pasado aumenten de tal modo que permitan hallar sin excesivas dificultades antiguos yacimientos. La investigación geofísica no es barata; pero la trascendencia económica de las perforaciones oceánicas y de todo este tipo de investigaciones no puede ni debe ser olvidada.

El primer paso a seguir para proceder a la reconstrucción de los continentes que existieron antes del Pangea es sencillo. Si se acepta que todas las cordilleras de montañas se han formado a causa de la actividad tectónica, y que en general han implicado la desaparición de un océano, lo primero que debe hacerse es "seguir la pista" mediante el estudio de las mismas

hasta conseguir reconstruir las posiciones de los antiguos márgenes continentales, tal como señala Nigel Calder en su libro *Restless Earth**. Este método puede ser válido incluso para cordilleras actualmente situadas en el medio de los continentes, como los Urales. Estas montañas se formaron hace 225 millones de años, cuando Europa y Asia colisionaron; ése fue uno de los últimos accidentes tectónicos que precedieron a la formación del Pangea.

Por ahora, los datos adquiridos sobre la formación de la Tierra permiten retroceder en el tiempo como máximo hasta el momento en que se produjo la rotura del supercontinente que precedió al Pangea, unos 500 millones de años atrás. Aproximadamente en la misma época tuvieron lugar importantes cambios en la evolución de las plantas y los animales: por primera vez, los seres vivos que habitaban en los océanos surgieron a tierra firme. En aquel tiempo, la mayor parte de las masas terrestres estaban unidas formando una especie de super-Gondwana alrededor del Polo Sur. Cuando los distintos fragmentos continentales empezaron a separarse, la mayor parte de lo que actualmente es Europa formaba parte de "África" y el resto de "Europa" estaba unido a "Norteamérica". Hace unos 420 millones de años, se produjo una colisión entre esos dos continentes a raíz de la cual surgieron las montañas de Noruega y Escocia, y se produjo el inicio de la actividad en la Falla del Great Glen (véase el cap. 7). Unos 100 millones de años más tarde, las colisiones con el resto de "África" y con "Asia" provocaron la formación de cadenas montañosas de dirección este-oeste en Europa y norte-sur en Rusia. Había nacido el Pangea, que se dividiría, 50 millones de años más tarde, en dos supercontinentes (Gondwana y Laurasia) que darían lugar a los continentes actuales, aunque las posiciones de algunos de ellos hayan cambiado sensiblemente.

Es muy posible que la actividad tectónica sea un antiguo rasgo característico de la Tierra. Las observaciones geológicas

* Publicaciones de la B. B. C., Londres, 1972.

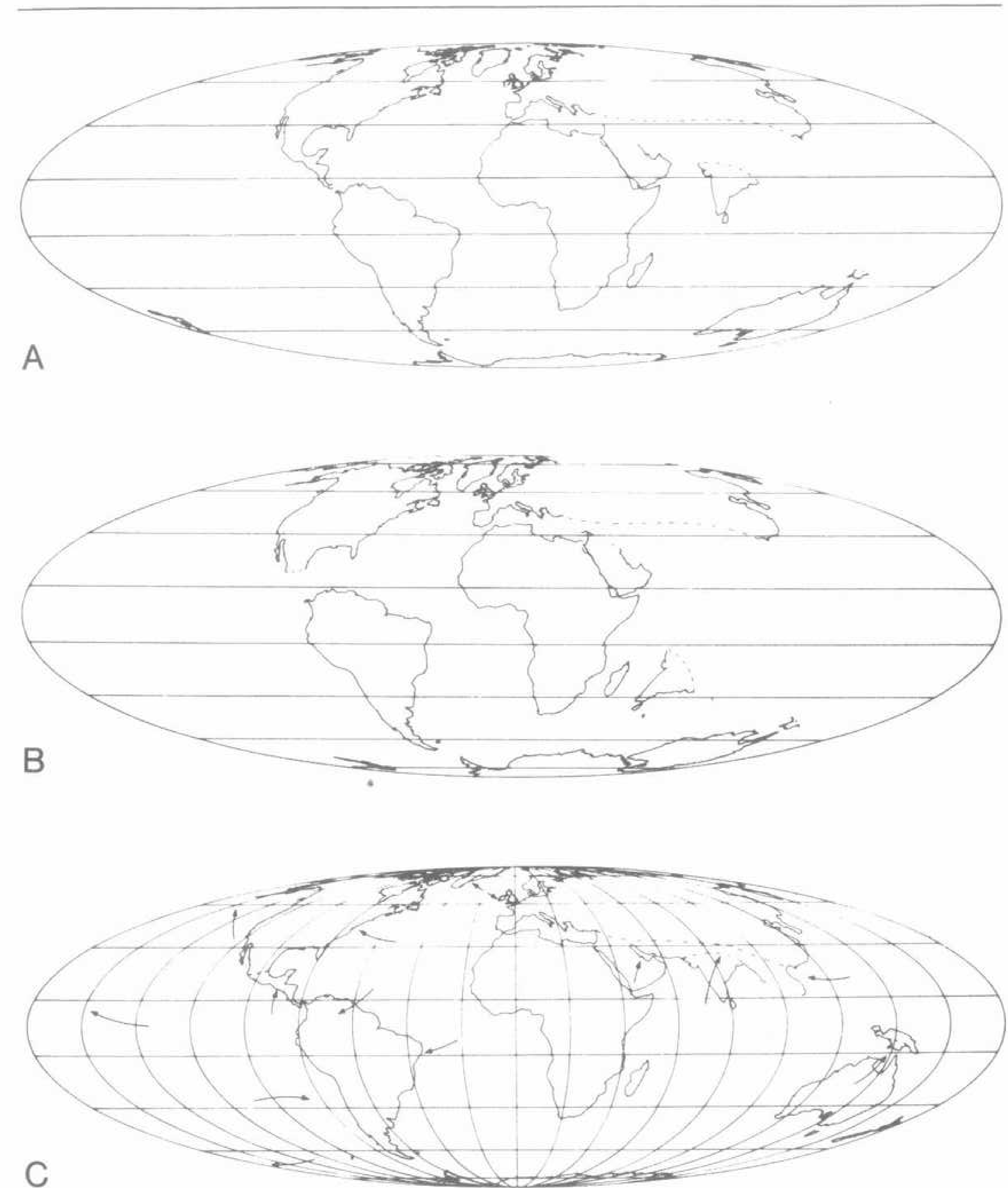


Fig. 7. Reconstrucción de las localizaciones de los continentes: (A) hace 75 millones de años y (B) hace 35 millones de años, comparadas con las situaciones actuales (C) sobre la misma proyección. Las direcciones actuales de deriva van señaladas con flechas. Se ha elegido la placa africana de forma arbitraria como el patrón "estacionario" contra el cual se miden los movimientos relativos. (Cortesía del Dr. D. McKenzie, Universidad de Cambridge.)

sugieren que 2.000 millones de años atrás no existían grandes continentes; además, actualmente está demostrado que la actividad tectónica tiende a aumentar el tamaño de los continentes, sobre todo mediante la formación de sistemas montañosos que se incorporan a ellos de manera definitiva (como es el caso de Sudamérica y Chipre). Por el momento, no se conocen las fuerzas motrices de la actividad tectónica; pero se sabe que están relacionadas con los procesos que tienen lugar en el interior de la Tierra, de los que tratará el próximo capítulo.

VI. EL INTERIOR DE LA TIERRA: ¿CUÁL ES LA FUERZA MOTRIZ DE LA DERIVA CONTINENTAL?

La corteza de la Tierra está constituida por diversas placas, en constante movimiento unas respecto a otras; como consecuencia, se crea y se destruye corteza oceánica. Pero, ¿cuál es la fuerza motriz que mueve estas placas? Puesto que se sabe que el interior de la Tierra está caliente y que, por tanto, algunas de sus capas deben ser fluidas, es lógico pensar que la convección sea la causa del movimiento de las placas. No obstante, aún no se conoce con precisión qué es lo que en realidad ocurre en el interior de la Tierra y, aunque las teorías basadas en la convección sean las más ampliamente aceptadas, tal vez se demuestre algún día que las ideas expuestas en este capítulo son incorrectas. En los últimos años se han hecho progresos muy notables, especialmente en el campo de la sismología, pero el estudio del interior de la Tierra sigue siendo el aspecto más desconocido y difícil de investigar en la nueva concepción geofísica de nuestro planeta.

Uno de los mayores problemas con que se encuentran los geofísicos que estudian el movimiento de los continentes es la enorme magnitud de las variables espacio/tiempo en la medición de los cambios que afectan a la corteza terrestre. Sin embargo, se ha hallado recientemente en el volcán Kilauea (Hawai) un interesante modelo natural de los procesos de la tectónica de placas en el que se reproducen, a pequeña escala, muchos de los fenómenos característicos del sistema tectónico global. Constituye una pieza clave en la comprensión de la

naturaleza de las fuerzas de convección que provocan el movimiento de las placas.

Este sistema tectónico en miniatura se produjo como consecuencia de una larga erupción del volcán desde el mes de mayo de 1969 hasta el mes de noviembre de 1971, y que fue seguida de cerca por un equipo científico perteneciente al Servicio Geológico de Estados Unidos. Durante la erupción, una columna de lava quedó estancada dentro del cráter del volcán y, al enfriarse, se convirtió en una costra superficial. Previamente, la columna había ascendido y descendido decenas de metros emitiendo gases, pero las erupciones en otras zonas del cono volcánico fueron, al parecer, la causa de su estancamiento. En esa situación, existía una circulación convectiva estacionaria de lava dentro de la columna; dicha circulación movía bloques de la costra enfriada de manera similar a como la corteza terrestre es movida por el material fundido del interior. Debido a los movimientos convectivos, la costra de lava se fracturó en repetidas ocasiones; en algunos lugares, los fragmentos eran engullidos por el material fundido, mientras que en otros se iba formando una nueva costra a medida que la lava se enfriaba y solidificaba.

Naturalmente, ese modelo a pequeña escala sólo puede tener una semejanza muy ligera con la tectónica del conjunto del planeta. Pero en muchos aspectos existía un paralelismo remarcable. Por ejemplo, la nueva costra se iba formando con la lava que emergía de las grietas de la superficie; en algunas zonas, los fragmentos de costra chocaban y se superponían (igual que ocurre en las placas), refundiéndose las que quedaban hundidas. Además, en la costra de lava existían también contactos más complejos en los que se encontraban tres fragmentos distintos; todo ello se asemejaba mucho a lo que se cree que ocurre en la corteza de la Tierra. Este descubrimiento es mucho más que un juego de la naturaleza, puesto que sus semejanzas con los modelos de la tectónica global hacen que aumente la credibilidad de los mismos, no sólo en sus líneas maestras, sino incluso en los detalles de los procesos de los contactos entre placas. Y una vez comprobado que

la convección es la fuerza motriz del sistema tectónico en miniatura del Kilauea, persisten muy pocas dudas en relación a que la convección, de una u otra forma, mueve la maquinaria de la tectónica global. La pregunta es ¿de qué forma? ¿Y cómo pueden los geofísicos obtener información acerca de las partes de nuestro planeta situadas por debajo de la corteza exterior?

Aunque la respuesta a la primera pregunta aún no está totalmente clara, parece que hay pocas posibilidades donde elegir. Sin embargo, la segunda pregunta sólo tiene por ahora una respuesta posible: únicamente la sismología proporciona información fiable sobre el interior de la Tierra. La sismología utilizada para estos fines no consiste en detonar unos cuantos kilogramos de explosivos en un pozo y registrar la propagación de las ondas sónicas producidas a través de las rocas. Para estudiar las profundidades de la Tierra se necesitan ondas sísmicas mucho más potentes, las cuales sólo se producen en los terremotos naturales o, en los últimos años, en las explosiones nucleares subterráneas. Los sismólogos han estado estudiando desde hace muchos años los efectos de la estructura de la Tierra sobre las sacudidas sísmicas naturales; pero en los años 60, la sismología recibió un impulso decisivo cuando los gobiernos se dieron cuenta de lo importante que era contar con técnicas sismológicas que permitiesen distinguir los ensayos nucleares de los terremotos naturales. Debido a esta motivación política, los científicos obtuvieron los recursos económicos que sirvieron para desarrollar un gran número de técnicas gracias a las cuales ahora se conoce lo que ocurre debajo de nuestros pies. Irónicamente, al menos desde el punto de vista de los políticos, el elevado grado de comprensión alcanzado en la sismología de los terremotos naturales (subproducto en realidad del desarrollo nuclear) ha llevado en la actualidad a una situación tal que, bajo determinadas circunstancias, se pueden provocar explosiones nucleares cuyas ondas de choque sean una imitación casi perfecta de las de los terremotos naturales. Al parecer, aún queda mucho camino por recorrer si se quieren prohibir los ensayos nucleares subterráneos.

Una tarea esmerada y metódica ha sido, como en tantos otros campos de la ciencia, la que ha permitido a los sismólogos desarrollar una nueva concepción del interior de la Tierra. Pero antes de formular las grandes interpretaciones es necesario conocer algunos aspectos más concretos. Por eso, antes de describir la estructura general del interior de la Tierra tal como ahora se concibe es necesario conocer algunos detalles esclarecedores. Quien desee conocer un mayor número de detalles debería leer el capítulo "The fine structure of the Earth's interior" ("La estructura detallada del interior de la Tierra"), del libro *Planet Earth* ("Planeta Tierra").*

Las investigaciones sobre las ondas sísmicas de alta velocidad reflejadas en el núcleo de la Tierra dan una idea de la sofisticación de las modernas técnicas sismológicas. En general, las ondas sísmicas (naturales o artificiales) pueden propagarse desde la fuente hasta detectores situados en otras partes del mundo, ya sea siguiendo una trayectoria más o menos directa a través de las capas superiores de la Tierra o por sucesivas refracciones en los límites de las diferentes regiones del interior. Si eso fuese todo, las ondas sísmicas serían fáciles de interpretar. Pero al igual que cuando la luz viaja a través de medios diferentes, las ondas sónicas de origen sísmico pueden ser desviadas y su velocidad modificada a medida que atraviesan regiones de distinta densidad. Por eso es necesario conocer el momento exacto en que una perturbación sísmica se produce y también el tiempo que tardan los diferentes tipos de ondas sísmicas en alcanzar los receptores; así se podrá calcular la velocidad de propagación de dichas ondas. Algunos de los factores de incertidumbre pueden ser eliminados instalando una red de detectores que registren todos los tipos de ondas sísmicas producidas durante un terremoto. Actualmente existen grandes sistemas de sismómetros que se utilizan prácticamente de la misma manera que los grandes radiotelescopios en la interpretación del ruido que procede de los cuerpos espaciales. El estadounidense "Large Aperture

* W. H. Freeman. Reading. 1975. Lecturas de *Scientific American*.

Seismic Array" (LASA) es uno de esos grandes sistemas o redes de sismómetros; está formado por 525 sismómetros interconectados, distribuidos en 21 grupos que cubren una superficie total de 200 km de diámetro. Es chocante pensar que el gran salto hacia delante en los conocimientos acerca del interior de la Tierra fue posible gracias al financiamiento que, procedente de los correspondientes departamentos de defensa, permitió la construcción de los grandes sistemas o redes de sismómetros. La información suministrada por estas redes gigantes muestra no sólo la división del interior de la Tierra en diferentes capas, sino incluso los ecos procedentes de estructuras específicas próximas a la superficie, como los fragmentos de una antigua corteza oceánica que aún se está deslizando hacia mayores profundidades bajo la masa continental eurasiática. Dicha corteza oceánica corresponde a un antiguo sistema de océano y a una fosa oceánica que desaparecieron debido a la soldadura de dos antiguos continentes, a partir de los cuales se formó el actual bloque continental de Eurasia. Los grandes ensayos nucleares subterráneos (como la explosión de Cannikin, el 6 de noviembre de 1971) constituyen el mejor de los experimentos para conocer los detalles de la estructura del interior de la Tierra, puesto que las ondas sísmicas producidas como consecuencia de los mismos pueden ser registradas en todos los rincones del globo.

Cannikin fue un ensayo subterráneo hecho por Estados Unidos en un profundo pozo en la isla de Amchitka, cerca de Alaska; las ondas generadas se propagaron por todo el mundo y fueron registradas por muchas estaciones sísmicas. En Australia, un equipo de la Universidad Nacional Australiana de Canberra hizo minuciosos preparativos que permitieron efectuar observaciones altamente interesantes. Tres semanas antes de la explosión instalaron diez estaciones sísmicas portátiles entre Canberra y Maralinga, en el este de Australia, las cuales se añadieron a una red de cuatro estaciones permanentes pertenecientes a la U.N.A. y a la Universidad de Adelaida; así se pudo conseguir una alineación de detectores de unos 1.700 km de largo en dirección noroeste-sudeste aproxi-

madamente. Estudiando la explosión anunciada y disponiendo su cadena de receptores de manera que cada estación estuviese a igual distancia del punto de la explosión, los australianos consiguieron eliminar muchas de las variables de incertidumbre que intervienen en la interpretación de las perturbaciones sísmicas más comunes. Como resultado de todo esto fueron capaces de determinar con gran fiabilidad que las señales registradas en los catorce detectores llegaban 1,5 segundos antes al extremo oeste que al extremo este; eso demuestra que las variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas P en el manto son distintas en diferentes partes de Australia. El incremento de velocidad hacia el oeste es particularmente marcado aproximadamente en la mitad de la línea de detectores, y eso sugiere que la región del manto en la cual las velocidades sísmicas son bajas (la zona de baja velocidad) se estrecha en ese lugar debido, probablemente, a que coincide con el borde de un antiguo continente.

Los equipos sísmicos están actualmente tan perfeccionados que en 1972 se registraron hasta en Brasil y en Australia las ondas sísmicas generadas por una explosión de tan sólo diez toneladas de TNT efectuada en el Mar del Norte, hecho que contrasta fuertemente con la gran explosión de Cannikin. Eso pudo conseguirse debido a un cierto conocimiento previo del interior de la Tierra, lo que permitió calcular el volumen de la carga y la profundidad en el mar a que debía producirse la explosión para obtener las mayores posibilidades de registro en áreas alejadas. El éxito de este experimento del Instituto de Ciencias Geológicas del Reino Unido demostró, por un lado, que las previsiones efectuadas acerca de la estructura del interior de la Tierra eran correctas y, por otro lado, que este tipo de pequeñas explosiones podía ser utilizado para conocer los detalles de la estructura de la corteza. Uno de los aspectos más remarcables de este caso es que el equipo del I.C.G. no advirtió con antelación a nadie acerca de la explosión; después, los científicos ingleses esperaron para ver si sus colegas, en otras partes del mundo, habían podido detectar la explosión aun sin estar prevenidos. Las confirmaciones llegaron tanto desde Gran Bretaña y el continente europeo como de Estados Unidos, Canadá, Australia, África y Brasil y, además, incluso las estaciones más alejadas fueron capaces de calcular con bastante exactitud la potencia de la explosión; y eso es remarcable, especialmente si se tiene en cuenta que las ondas llegadas a las estaciones más alejadas estaban muy debilitadas debido a las largas distancias recorridas.

Sin embargo, esta técnica se aplica en realidad para conocer más detalles acerca de la corteza terrestre que para obtener información acerca de los niveles más profundos del planeta. A pesar de todo, las ondas sísmicas que se desplazan en lo más profundo revelan que la Tierra está formada por diferentes capas que van desde un núcleo interno sólido de unos 1.000 kilómetros de radio hasta las placas corticales. Estas capas están representadas en la figura 8. Es especialmente remarcable el hecho de que el núcleo no es totalmente líquido, sino que tiene a su vez un núcleo interior sólido casi tan grande como la Luna; también debe tenerse en cuenta que las partes más externas de nuestro planeta están constituidas por múltiples capas, por lo que la idea expuesta de una corteza sólida flotando sobre el manto debe interpretarse como una simplificación. Si se quiere conocer qué es lo que mueve la maquinaria de la tectónica de placas, tendremos que centrarnos un poco más en esas capas superficiales.

El manto en sí es sólido, pero está dividido en dos regiones separadas por una zona de transición. Eso es debido a que, a gran profundidad y presión, la estructura cristalina de las rocas se reordena, con lo que el material aumenta su densidad y ocupa menos espacio. Por encima de la parte más ligera del manto hay otra zona de transición, la zona de baja velocidad de la cual ya hemos hablado, que parece estar constituida por una mezcla de rocas fundidas y fragmentos sólidos continuamente reciclados por el movimiento de las placas corticales. Encima de esta capa lubricante están las placas de la corteza, algunas de las cuales pueden alcanzar los sesenta y cuatro kilómetros de espesor; dichas placas conforman el rompecabezas móvil sobre el cual apoyamos nues-

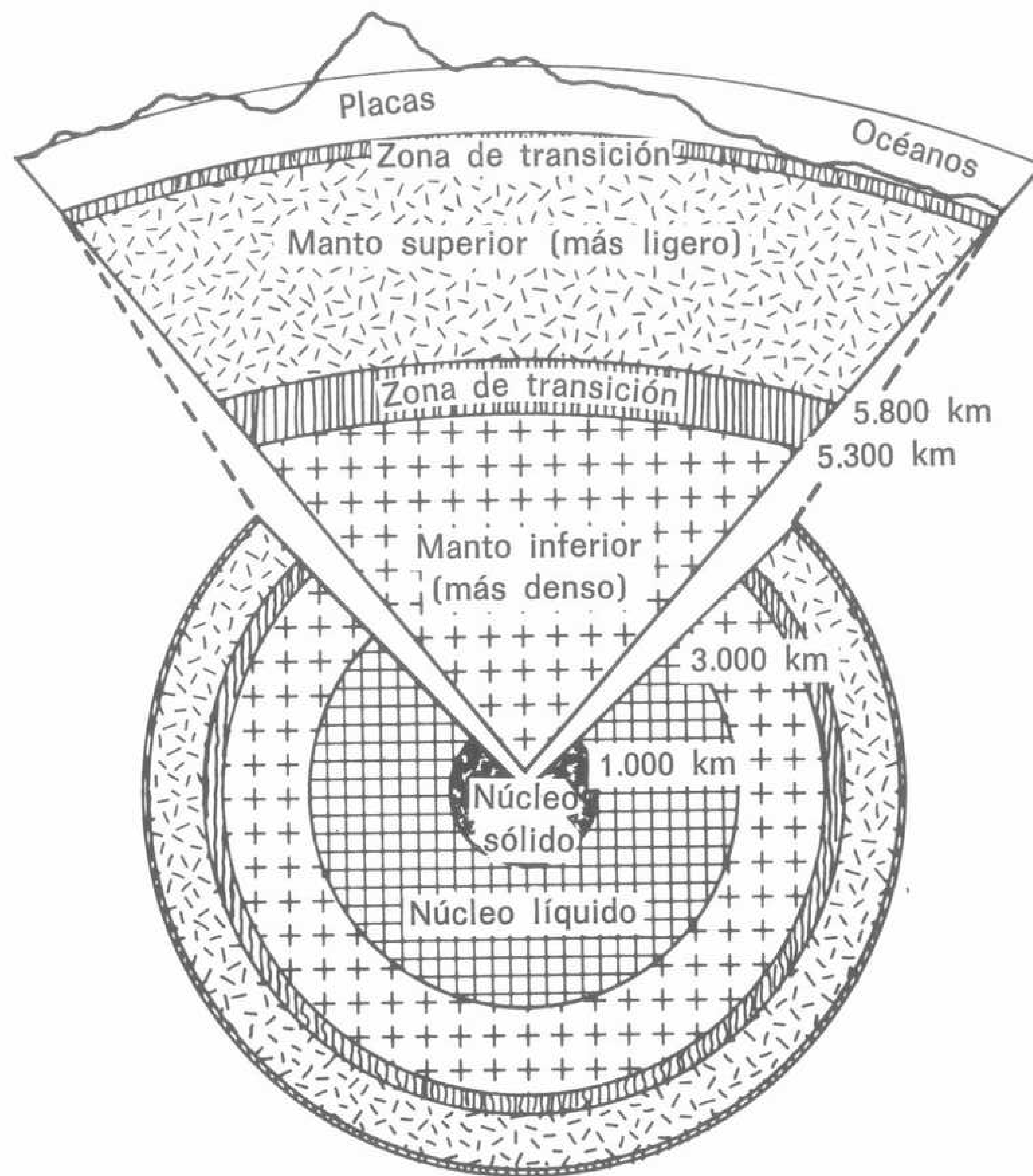


Fig. 8. Las capas del interior de la Tierra.

tros pies. En las regiones oceánicas, la corteza sólo tiene unos pocos kilómetros de espesor; en las regiones continentales su espesor es de unas decenas de kilómetros. En realidad, las placas forman parte del manto superior.

En estas condiciones, cuando se pretende estudiar los detalles de los supuestos procesos de convección que mueven las placas sólo nos estamos ocupando de una pequeñísima parte de lo que es la Tierra en sí. Sin embargo, antes de

adentrarnos en los detalles de ese pequeño volumen –especialmente interesante para comprender los procesos que hacen cambiar continuamente la faz de la Tierra y que dan lugar a la formación de bolsas de recursos naturales– tal vez deberíamos dedicar algo de atención a otro campo de investigación que proporciona ciertas claves y las primeras respuestas a la pregunta de qué es lo que hay debajo de nuestros pies. Aunque no está tan perfeccionado como la sismología, el estudio del campo magnético de la Tierra tiene también su propio atractivo.

El campo magnético de la Tierra se origina en algún lugar (y de alguna manera) en el interior de la misma, y la única explicación ampliamente aceptada es que está generado por algún tipo de efecto dinamo. Dicha dinamo estaría alimentada por las corrientes eléctricas que se producen en la parte fluida del núcleo terrestre. Esta explicación es, como se ve, muy vaga y, además, aún está llena de incertidumbres, ya que nuestro conocimiento acerca de lo que ocurre en las grandes profundidades de la Tierra es muy escaso, a pesar de la gran ayuda proporcionada por las modernas técnicas sísmicas. Por otro lado, se ha visto que no es nada fácil construir una teoría coherente que muestre cómo se produce esa acción de dinamo en el interior de la Tierra. Teniendo en cuenta todas estas dificultades, es realmente un éxito extraordinario de las modernas ciencias de la Tierra el que algunos investigadores hayan formulado no sólo una teoría razonable acerca del efecto dinamo sino que incluso hayan mostrado cómo a lo largo del tiempo puede invertirse la polaridad de la misma; de este modo, se ha hallado una explicación a las inversiones magnéticas registradas en las "bandas" de los fondos oceánicos, las cuales, por otro lado, tuvieron una importancia decisiva para convencer a los geofísicos de la realidad de la deriva continental y de la expansión de los fondos oceánicos.

En su formulación inicial, el modelo adoptó la forma de una descripción matemática de lo que puede estar ocurriendo en el interior de la Tierra. La teoría describe el efecto dinamo en función de una esfera conductora estacionaria en cuyo in-

terior hay dos esferas más pequeñas en rotación. En su forma más simple, esto es sólo una burda aproximación a las condiciones existentes en el interior de la Tierra, pero el éxito de las predicciones matemáticas animó a un equipo de la Universidad de Newcastle a construir en el laboratorio un modelo físico equivalente. En él, las esferas estaban sustituidas por cilindros de acero que rotaban dentro de unos agujeros practicados en un bloque del mismo material. Los cilindros podían rotar y bascular independientemente el uno del otro, pero manteniéndose en contacto eléctrico con el bloque estacionario mediante una película de mercurio. Bajo ciertas condiciones, los dos cilindros en rotación producían un campo magnético debido al efecto dinamo.

A pesar de que este modelo sólo imita algunos de los grandes rasgos de la Tierra, el campo que produce oscila cada 20 a 40 segundos, hecho que guarda un evidente paralelismo con el movimiento de los polos magnéticos de la Tierra en relación con los polos geográficos. Bajo las condiciones adecuadas, también da lugar a inversiones totales del campo magnético generado, tal como ocurre con las inversiones geomagnéticas de la Tierra. El estudio de estos procesos no ha hecho más que empezar, pero parece que los investigadores están en el buen camino. Las inversiones magnéticas terrestres pueden ser provocadas por cambios en los sistemas de convección de las capas fluidas del interior de la Tierra, los cuales pueden ser originados a su vez por pequeñas variaciones del calor producido en diferentes puntos del interior del planeta.

Las particularidades del magnetismo terrestre también pueden proporcionar información acerca de las "rugosidades" existentes en el contacto entre el manto y el núcleo fluido. Las irregularidades en la base del manto pueden provocar perturbaciones en el núcleo fluido, que harían variar el flujo generador del campo magnético. Algunos estudios efectuados a finales de los 60 e inicios de los 70 indican que la estructura del campo gravitatorio terrestre (que presenta irregularidades en el espesor del manto) obedece a un modelo que puede estar relacionado con la propia estructura del campo magnético. Pero el trabajo que debe hacerse en este terreno es mucho más complejo que el que se requiere para explicar simplemente por qué la Tierra tiene un Polo Norte y un Polo Sur magnéticos; y es sorprendente constatar que la mayor oposición que han encontrado los geofísicos interesados en desarrollar este tipo de investigaciones procede de sus propios colegas. Muchos geofísicos opinan, en efecto, que es mejor dejar para más adelante el estudio de las grandes profundidades y concentrar todos los esfuerzos en el estudio de las capas más superficiales, con el fin de mejorar las interpretaciones acerca de los mecanismos convectivos responsables de los movimientos de las placas corticales.

Para explicar el movimiento de las placas existen cuatro mecanismos principales, dos de los cuales no están directamente relacionados con la convección. Parece bastante probable que en la realidad operen los cuatro procesos con importancia relativa que variará de un lugar a otro; pero es más fácil darse cuenta de lo que en realidad ocurre considerándolos por separado. En primer lugar, existen los efectos gravitacionales simples causados directamente por el peso de las propias placas. En las dorsales oceánicas, la acumulación de material da lugar a espesores mayores que los habituales; teniendo en cuenta la presencia de la capa lubricante justo por debajo de las mismas, parece lógico pensar que la corteza recién creada se deslizará hacia ambos lados de las dorsales. Cuando la corteza se está destruyendo en las grandes fosas oceánicas, la capa que se está hundiendo en el manto se mantiene intacta durante largo tiempo y en su recorrido descendente llega a situarse debajo del continente adyacente, tal como muestran los estudios de sísmica de reflexión. Durante este proceso, es probable que el efecto de arrastre debido al movimiento descendente de la antigua corteza oceánica favorezca la expansión de los fondos oceánicos en las dorsales situadas en el lado opuesto de la placa. Una vez que la actividad tectónica ha empezado, ambos efectos gravitacionales pueden contribuir a cambiar la faz de la Tierra, y seguramen-

te lo están haciendo ahora, si bien sólo son realmente importantes cerca de las dorsales y de las fosas oceánicas. Aun así, la convección sigue siendo la principal candidata a recibir el título de fuerza motriz por excelencia de la tectónica de placas, tanto en el pasado como en la actualidad.

Cuando se calienta un fluido, éste tiende a expandirse, por lo que su densidad disminuye al mismo tiempo que las partes más calientes ascienden hacia la superficie. En la superficie se produce una pérdida de calor y el enfriamiento subsiguiente hace que la densidad del líquido vuelva a aumentar, por lo que éste se hunde de nuevo. El proceso se repite indefinidamente con el material fluido circulando una y otra vez por convección. El proceso puede ser visualizado fácilmente mediante un recipiente con agua puesto a calentar; o en ese tipo de lámparas decorativas rellenas con aceites de colores que circulan siguiendo trayectorias convectivas debido al calor generado por la bombilla situada en la base de la lámpara. Pero a pesar de que las leyes de la física nos digan que debe ocurrir así, no es sencillo imaginarse a las rocas comportándose de esa manera. La convección del material rocoso es, por supuesto, muy lenta en relación con la escala humana del tiempo y se diferencia de la convección que se produce en un recipiente con agua (o en una lámpara decorativa) en que el calor no procede de los niveles inferiores sino de las desintegraciones radiactivas que ocurren sin cesar en el seno del material fluido. Y eso es justamente lo que se necesita para explicar por qué las células convectivas de las capas superiores de la Tierra son tan grandes.

Un material calentado de esa manera no se rompe formando muchas pequeñas células de convección cuadradas (que es lo que ocurre dentro del recipiente), sino que da lugar a células oblongas muy alargadas, mucho más anchas que profundas. El espesor de estas capas convectivas situadas en la superficie de la Tierra es de tan sólo unos pocos centenares de kilómetros, pero la longitud de una célula convectiva que vaya desde una dorsal oceánica hasta una fosa puede ser de muchos miles de kilómetros. Por el momento, el esquema es

aún bastante impreciso. Un mapa de los límites entre placas (véase la figura 4, en la página 68) no muestra de manera clara cómo se podría dividir a la Tierra en células de convección y, además, en los ensayos de laboratorio no se tienen en cuenta todos los factores que intervienen en los complejos procesos naturales que cambian el aspecto de todo un planeta. Existe, sin embargo, la posibilidad de, por un lado, reconocer las dificultades con que topa la dilucidación de dichas complejidades y, por otro lado, emprender una nueva línea que tal vez sea válida para investigar cómo evolucionaron las placas en el pasado.

Nos referimos al concepto de los "puntos calientes" ("hot spots"), que, si bien han sido propuestos como la fuerza motriz fundamental de la tectónica de placas, podrían convertirse en un complicado factor adicional que actuaría paralelamente al flujo convectivo global. Según esta teoría, quizá existen en la Tierra algunos lugares en los que emerge material caliente por unas columnas o chimeneas estrechas que nacen en las profundidades del planeta. El poderoso efecto, geográficamente muy localizado, de esta forma particular de convección podría contribuir a la movilidad de las placas de la corteza terrestre y, lo que es más interesante, podría explicar la formación de sistemas como la cadena volcánica de las Islas Hawai, que se produjo en el centro de una gran placa oceánica y muy lejos de las zonas de gran actividad geológica situadas en los bordes de las placas.

Hawai, situada al sudeste de la cadena, es la más joven de todas esas islas y aún sigue volcánicamente activa. Las islas situadas hacia el noroeste son más antiguas que Hawai y actualmente inactivas, aunque también tienen un origen volcánico. Las islas se han ido formando, una a una, a medida que han ido surgiendo nuevos volcanes a lo largo de una línea casi recta, con un solo tramo curvo que da paso a una alineación en dirección norte en donde se sitúan las islas más antiguas; en cambio, la dirección de la parte más joven de la cadena es hacia el noroeste. La explicación de esta disposición resulta bastante sencilla si se recurre al concepto de los pun-

tos calientes. Actualmente se poseen evidencias de que la placa del Pacífico se está desplazando hacia el noroeste; si existiera un punto caliente en su centro, éste podría haber perforado una serie de agujeros, alineados en la misma dirección en que se mueve la placa, a través de la delgada corteza oceánica. Cada agujero habría dado lugar a una isla volcánica y, a medida que las islas antiguas irían siendo transportadas por la placa hacia el noroeste, se irían formando nuevas islas justo encima del punto caliente.

¿Cómo se explica entonces la curvatura que presenta la alineación de estas islas? La explicación más sencilla es que hace unos 40 millones de años la placa del Pacífico cambió la dirección de movimiento, pasando de una trayectoria hacia el norte a la actual trayectoria hacia el noroeste. Las islas más antiguas se habrían formado, así, durante una fase particular en la deriva de la placa del Pacífico. Al menos otras dos cadenas de islas en el Pacífico muestran la misma distribución que la cadena hawaiana, incluidas sendas curvas de 40 millones de años de antigüedad. Si la teoría de los puntos calientes es correcta, el conjunto de dichas cadenas insulares revela el movimiento de la placa del Pacífico durante los últimos 100 millones de años. En este sentido es interesante señalar que el sistema de San Andrés, en California, empezó a formarse hace 30 ó 40 millones de años, cuando Norteamérica se solapó a la prolongación septentrional de la dorsal expansiva del Océano Pacífico. Tal vez esta colisión ha sido el factor determinante en el cambio de dirección de la placa del Pacífico y, por tanto, sea la responsable indirecta de la curva existente en las cadenas insulares reseñadas.

Aunque la cadena hawaiana constituye un claro ejemplo de los efectos supuestamente debidos a los puntos calientes, en otros lugares del globo la situación es mucho más confusa. Según la teoría de los puntos calientes, Islandia es uno de ellos, y las antiguas islas volcánicas de Escocia fueron formadas por el mismo punto caliente que es el responsable de la actual actividad volcánica de Islandia. Pero Islandia, a diferencia de Hawai, puede ser explicada de manera harto convincente

como el resultado de una dorsal expansiva, y además está situada en una zona de contacto entre placas, situación en la que cabe esperar la existencia de actividad volcánica sin necesidad de recurrir al concepto de los puntos calientes. No es así, sin embargo, en EE.UU., donde la presencia de un punto caliente permitiría explicar la actividad geológica de la región de Yellowstone. Podríamos encontrar otros muchos ejemplos tanto favorables como contrarios a la teoría de los puntos calientes. Actualmente, la controversia suscitada en la geofísica acerca de la existencia o no de los puntos calientes es una de las más encendidas; e incluso algunos pioneros de la tectónica de placas, incluyendo a Dan McKenzie, opinan que esa teoría es difícilmente creíble. En el fondo no se encuentra ninguna objeción lo suficientemente seria como para negar la existencia de los puntos calientes; además, podrían ser la complicación adicional que permitiría explicar las causas iniciales del movimiento de las placas y por qué se detuvo la formación de células convectivas fácilmente distinguibles en los mapas geológicos.

Sin embargo, sean cuales sean los detalles del proceso, la cantidad de energía producida por el calor del interior de la Tierra, y utilizada para mover los continentes mediante la convección, es realmente descomunal. Estamos inmersos en una crisis energética que probablemente durará veinte o más años, incluso en el caso de que se conviertan en realidad las esperanzas depositadas en la fusión nuclear como fuente ilimitada de energía limpia. ¿Será posible entonces utilizar durante las próximas décadas parte de la ingente cantidad de energía geotérmica existente? La respuesta parece ser positiva, pero con reservas.

La existencia de energía geotérmica es conocida desde mucho tiempo atrás; los géiseres y las fuentes termales son una manifestación de la misma. Sin embargo, hasta los últimos años los geofísicos no se han dado cuenta de la gran cantidad de regiones del mundo en las que hay formaciones geológicas próximas a la superficie que contienen vapor de agua y agua caliente que podrían ser explotadas fácilmente.

El calor de estas reservas geotérmicas se cree que procede de variaciones en la convección de los niveles inferiores, que aún no se comprenden bien, y que en algunos lugares parece ser que empuja masas de magma hacia la base de la corteza (serían como "mini-puntos calientes"). Si las rocas situadas encima de esos domos de magma son porosas o están fisuradas y además contienen agua, ésta pronto va a sobrecalentarse (estamos hablando de profundidades de ocho o nueve kilómetros debajo de la superficie, en las que la presión es tan elevada que el agua se mantendrá en estado líquido incluso a temperaturas de 250 °C). Si las fisuras de la roca permiten que el agua sobrecalentada alcance la superficie, ésta saldrá al exterior con violencia en forma de vapor de agua. Si dichas grietas naturales no existen, es relativamente sencillo perforar un pozo que llegue hasta la capa porosa en la que se encuentra almacenada el agua sobrecalentada.

Actualmente se producen en el mundo más de cuatro millones de kilowatios de energía de origen geotérmico. Sólo en una zona del norte de California (el campo de los Géiseres) existe una capacidad potencial estimada de tres millones de kilowatios y en el valle Imperial del sur de California se espera explotar un potencial geotérmico de 20 millones de kilowatios. En Italia existe desde el año 1904 una planta de producción de electricidad que está alimentada por el vapor procedente del campo de Lardello. Pero esta nueva fuente de energía alternativa sólo ha empezado a ser desarrollada en serio durante los últimos años, debido fundamentalmente al incremento de los costes de la obtención de energía de otras fuentes.

Existen tres tipos de reservas geotérmicas naturales: campos de vapor secos, de los que el agua no puede escapar; campos de vapor húmedos, en los que el vapor sale naturalmente a la superficie mezclado con agua caliente; y campos en los que el agua no está lo bastante caliente como para hervir y dar lugar a la aparición de fuentes termales. Incluso el agua caliente es útil –quizás para calefacciones caseras–, pero, por supuesto, la mayor cantidad de energía procede del vapor, el cual puede ser utilizado para mover turbinas que generen electricidad. La baja presión del vapor de agua natural limita la potencia de los generadores empleados (alrededor de unos 50 a 60 megawatios), que, si bien son pequeños en comparación con los de las centrales térmicas, presentan otras ventajas que les hacen altamente interesantes.

Además de suministrar energía, el vapor enfriado puede ser consumido como agua dulce y, en el caso de los campos húmedos, el vapor está a menudo cargado de minerales (sería una situación semejante a la existente en las cubetas de salmuera del Mar Rojo). Dicho en pocas palabras, los campos de vapor húmedos son los de mayor interés potencial, ya que proporcionan energía, agua caliente para calefacción y disoluciones ricas en minerales y susceptibles de ser sometidas a procesos de evaporación para extraer las materias primas que contienen. Parece ser la solución ideal, y aún más si tenemos en cuenta que la explotación de un campo geotérmico origina una contaminación mínima, comparada con las debidas a las fuentes de energía convencionales. Entonces, ¿por qué hemos formulado *reservas* a la respuesta afirmativa en relación con la posibilidad de que la energía geotérmica se convierta en las próximas décadas en nuestra fuente de abastecimiento principal?

Expresado llanamente, el problema es que la energía geotérmica es un recurso finito, igual que las reservas de petróleo y gas natural; por tal motivo, el desarrollo de la energía geotérmica sólo puede ser considerado como una solución a corto plazo. Las previsiones más optimistas parecen indicar que un campo geotérmico típico, convenientemente desarrollado y explotado, sólo puede proporcionar energía durante un período de no más de 30 años. Y aunque esto pueda suponer una ayuda considerable para salir de la presente crisis energética, es demasiado escaso, no sólo para nosotros sino especialmente para las generaciones posteriores, como para que pueda dejar de preocupar lo que vaya a ocurrir en el futuro. Por supuesto que la explotación de los nuevos campos geotérmicos que vayan descubriéndose en el mundo hará que

la utilización de este tipo de energía se prolongue durante más de treinta años, pero la energía geotérmica no es la solución a largo plazo de la crisis energética.

Uno de los principales factores que intervienen en la correcta explotación de los campos naturales es el bombeo de agua hacia el lugar donde se hallan las rocas calientes con el fin de sustituir el vapor que está siendo extraído. Esta agua se calentará a su vez y será reenviada a la superficie en forma de vapor; pero la principal dificultad reside en el hecho de que el bombeo de las enormes cantidades de agua necesarias para reemplazar totalmente los volúmenes extraídos es absolutamente antieconómico (en el campo de Wairakei, en Nueva Zelanda, se extraen 70 millones de toneladas de agua por año). Y, naturalmente, si se quieren explotar las reservas geotérmicas que no han alcanzado la superficie por sí mismas, será necesario efectuar grandes perforaciones cuyo coste puede ser de varios centenares de dólares por metro perforado. Si a esto se le añaden los costos de bombeo y de la infraestructura necesaria para que las plantas generadoras funcionen, es fácil darse cuenta que la energía geotérmica no es en realidad tan barata como parece. Son esas inversiones previas a la explotación de la energía extraída las que convierten en altamente arriesgadas muchas ideas potencialmente interesantes acerca de la explotación de la energía geotérmica.

Según algunos científicos la localización de regiones en las que existan reservas naturales de agua sobrecalentadas próximas a la superficie no debe preocuparnos demasiado ya que está demostrada la existencia de un gran número de zonas en las que hay rocas calientes secas a pocos kilómetros de profundidad. De acuerdo con estas ideas, lo que debe hacerse es perforar pozos en estas regiones secas, bombear agua hacia las profundidades y esperar a que el vapor empiece a salir al exterior por los agujeros practicados. La idea aún parece mejor si se considera, tal como sostienen sus defensores, que el agua bombeada puede provocar fisuras y hacer aumentar la permeabilidad de las rocas calentadas, hecho que facilitaría la circulación y la expulsión del vapor formado.

Sin embargo, es altamente improbable que esta idea pueda ser llevada a la práctica. Ya se ha mencionado el elevado coste de perforación de los pozos, que, especialmente tratándose de pozos de decenas de kilómetros de profundidad, es del orden de varios millones de dólares por pozo; téngase además en cuenta que para crear un campo de vapor artificial se necesita perforar varios pozos. Por otro lado, el agua tiene que ser traída de alguna parte y eso puede constituir en algunas ocasiones un obstáculo insalvable. El agua de mar tiene que ser bombeada hacia arriba al menos algunos metros, incluso en el mejor de los casos, suponiendo que los pozos estén cerca de la costa; la mayoría de los ríos de los países que están urgentemente necesitados de energía ya están siendo utilizados de una u otra manera por la industria. Imaginemos por un momento el escándalo que se produciría si el río Ebro o el Támesis fuesen desviados hacia el interior de un pozo practicado en el suelo con el fin de obtener vapor para alimentar una central de energía geotérmica.

Puede objetarse que si únicamente se piensa en términos económicos nunca aparecerá como un hecho rentable el desarrollo de nuevos recursos, pero el problema puede enfocarse desde otro punto de vista. La perforación de pozos es cara debido, fundamentalmente, a las grandes cantidades de energía que se consumen durante la misma; el transporte de agua hacia estas estaciones geotérmicas también puede suponer un notable gasto de energía y, además, es altamente cuestionable que el rendimiento energético del campo artificialmente creado vaya a ser mayor que el consumo total de energía necesario para ponerlo en funcionamiento. Pero éste no es un caso único. Según algunos cálculos, la cantidad de energía gastada en el desarrollo de las reservas petrolíferas del Mar del Norte (o sea, en las fábricas, construyendo las torres de perforación y sus accesorios; en el transporte de los materiales hasta los lugares de perforación; en el transporte del petróleo extraído hasta tierra firme; en el refinado del petróleo, etc.) es sólo ligeramente menor que la cantidad total de energía extraída en forma de petróleo. Por tales razones,

es necesaria una planificación extremadamente cuidadosa, a menos que se quiera correr el riesgo de pagar cien para ganar cincuenta. La energía geotérmica es realmente, y a corto plazo, la mejor solución a la crisis energética (obviando la posibilidad de prescindir de todos los aparatos que consuman energía), pero a más largo plazo se debe considerar seriamente el aprovechamiento de la energía liberada durante la fusión nuclear, tanto si procede de los reactores construidos por el hombre como del gran reactor natural que en realidad es el Sol. Mientras tanto, y cuando las huellas del paso del hombre por el mundo no sean más que un recuerdo, las fuerzas convectivas del ardiente corazón de la Tierra continuarán moviendo sin cesar el rompecabezas de las placas de la corteza de nuestro querido planeta.

VII. LA FALLA DE SAN ANDRÉS Y EL GREAT GLEN: DOS EJEMPLOS ILUSTRATIVOS

Ahora que ya se han examinado las líneas maestras del modelo global del mundo, vamos a ver hasta qué punto los procesos geofísicos pueden estar relacionados con la actividad humana; para ello haremos un viaje imaginario a dos partes del mundo intensamente afectadas por este tipo de procesos. En Escocia, los procesos que dieron nacimiento al "Great Glen"*, en donde se halla el Lago Ness (hogar del famoso monstruo), se encuentran en un estadio de desarrollo terminal; en California, la Falla de San Andrés representa un estadio inicial del mismo tipo de actividad. Estudiando estas dos situaciones ilustrativas podremos ver tanto el comienzo como el fin de los efectos de los desplazamientos laterales que se producen a lo largo de las grandes líneas de fractura. Ambos casos se prestan muy bien a ser estudiados con detalle, máxime cuando las investigaciones acerca de los movimientos horizontales de los bloques de la corteza terrestre son una pieza fundamental de la geofísica moderna ya que antes del advenimiento de la tectónica de placas se creía que la corteza podía desplazarse arriba y abajo pero no en sentido lateral.

La Falla de San Andrés constituye el tema central del libro de Robert Iacopi *Earthquake country* (El país de los terremotos), editado por Lane Books (California) en 1975. Sin embargo, y prescindiendo de los detalles más minuciosos, di-

* "Glen" es una palabra que se utiliza sobre todo en Escocia e Irlanda para designar un valle estrecho y abrupto de fondo generalmente plano y glaciado en mayor o menor grado.

cha falla puede ser descrita de una forma bastante concisa. El aspecto más importante es que la región costera californiana, situada al oeste de la falla, y la península de Baja California no pertenecen, en sentido geológico, al continente norteamericano, sino que forman parte de la placa del Pacífico, y la línea de San Andrés marca el límite entre dicha placa y la placa norteamericana. A lo largo del contacto entre ambas placas ni se genera ni se destruye corteza; simplemente, una placa roza con la otra a medida que van moviéndose. La placa del Pacífico está girando lentamente en sentido antihorario, por lo que, visto desde Norteamérica, el borde de la placa se desplaza de izquierda a derecha (o sea, hacia el norte). Por supuesto, para un observador situado en Monterrey o en la costa californiana sería el resto de América el que se movería de izquierda a derecha en dirección sur. Ambos puntos de vista están justificados; sea cual sea el lado de la falla en que se sitúe el observador, siempre verá a la otra placa desplazándose hacia la derecha. Por eso, la Falla de San Andrés es una falla lateral derecha.

Sin embargo, el desplazamiento lateral de una placa respecto a la otra no siempre se produce de forma suave, sino que muy a menudo la fricción entre ambas placas provoca sacudidas a lo largo de la Falla de San Andrés. La tensión aumenta progresivamente hasta un punto en que supera a la fricción entre las placas y entonces se produce un deslizamiento brusco del orden de decenas o centenares de metros. No se producirán nuevos movimientos hasta que la tensión no vuelva a ser lo bastante grande y, hasta que esto ocurra, pueden transcurrir muchos años. Las sacudidas que relajan los esfuerzos existentes son, por supuesto, terremotos; cuanto más largo es el intervalo de tiempo entre dos sacudidas sucesivas, peores consecuencias tendrá el próximo terremoto. Es inquietante saber que la parte sur de la falla, incluyendo la región de Los Ángeles, ha estado amenazadoramente quieta desde el año 1857. Pero, a pesar de la importancia que para los habitantes de la región tiene el carácter periódico de dichos deslizamientos, en términos tectónicos puede decirse que

este tipo de movimientos relativos de ambas placas tienen escasa trascendencia.

Cuando dos o más placas chocan, la situación parece complicada debido a que no existe un punto de referencia fijo sobre la superficie de la Tierra a partir del cual se puedan medir en términos absolutos los movimientos de dichas placas. Toda la superficie de la Tierra está formada por placas y todas ellas se mueven sin cesar. Cuando no referimos al Océano Atlántico, solemos decir que es un océano que se está ensanchando al mismo ritmo con que va surgiendo nuevo material en la dorsal medio-atlántica, pero raramente se menciona que en los continentes que bordean el Atlántico se están produciendo otros tipos de procesos tectónicos. Como, además, el Océano Atlántico es más o menos simétrico, constituye un ejemplo idóneo para explicar la expansión de los fondos oceánicos. Pero el Pacífico no es simétrico, y eso se debe a que los procesos tectónicos que han operado en su borde este (la costa de Norteamérica) durante los últimos períodos geológicos no han sido la réplica exacta de los procesos que se han desarrollado en el borde oeste (la costa de Asia). Este hecho complica el esquema, pero a partir del estudio de las anomalías magnéticas de los fondos oceánicos y gracias a la utilización de otras modernas técnicas, los geofísicos han podido explicar a grandes rasgos cuál es el motivo de la actual situación geológica del Pacífico.

No hace mucho tiempo, en términos geológicos, el Pacífico Norte era mucho más ancho de lo que es en nuestros días, y la dorsal expansiva existente en el fondo de la cuenca empujaba a la corteza oceánica hacia el norte. Actualmente, la dorsal expansiva es claramente visible en el Pacífico Sur, pero desaparece bruscamente cuando entra en Norteamérica, precisamente por el Golfo de California (véase la figura 4). Los estudios sísmicos han demostrado la existencia de una actividad tectónica residual debajo del continente norteamericano, asociada con la dorsal expansiva desaparecida; lo que ocurrió es que el continente norteamericano cubrió la antigua dorsal expansiva, aplastándola de la misma manera que un rodillo

de amasar aplana la pasta. Tal vez esto pueda parecer difícil de explicar; en el Pacífico Norte existía una dorsal expansiva de la cual surgía hacia ambos lados nueva corteza oceánica; entonces ¿cómo es posible que un continente llegase a aplastarla?

La respuesta es sencilla. La expansión del Océano Atlántico se ha producido a un ritmo mucho más rápido que la del Océano Pacífico, por lo que el desplazamiento del continente americano hacia el oeste se producía con mayor rapidez que la velocidad con que se estaba formando nueva corteza oceánica en la extinta dorsal expansiva del Pacífico Norte. Durante un largo período, la corteza del Pacífico fue desapareciendo debajo de una fosa oceánica paralela a la costa occidental de Norteamérica, y el ritmo de consumo en dicha fosa era más rápido que el de creación de nueva corteza en la dorsal. Cuando una zona constructiva choca con una zona destructiva, el resultado es la aniquilación mutua; es decir, se forma un contacto entre placas en el que ni se crea ni se destruye material. Debido a que la corteza oceánica del Pacífico aún está siendo consumida debajo de las fosas del margen continental asiático, y debido también a la desaparición de la actividad expansiva en el Pacífico Norte, dicha parte del Océano tiende a estrecharse cada vez más. Si llegara a desaparecer por completo, la colisión resultante entre Asia y Norteamérica generaría nuevas montañas y un nuevo supercontinente, preludio de la siguiente fase de la deriva continental.

Pero, ¿qué sucede con la Falla de San Andrés? Esta falla es muy importante porque representa el fin de la dorsal expansiva que aún persiste en el sur. Buena parte de la evolución geológica de California se produjo a lo largo de líneas comunes a los antiguos contactos destructivos entre las placas; el material que se hundía debajo de la fosa oceánica y que se extendía bajo el continente debe haber contribuido a la formación de las cadenas montañosas próximas a la costa (las Rocosas). Los ríos que drenaban las montañas recién formadas transportaban sedimentos que se iban acumulando en el fondo de la fosa oceánica, aguas afuera de la costa occidental de la antigua América del Norte. Cuando el continente cubrió a la dorsal expansiva, los sedimentos acumulados en la fosa fueron arrastrados hacia el sector correspondiente a la vertiente oeste de la antigua dorsal: el levantamiento posterior de dicho sector por encima del nivel del mar habría dado lugar a la formación de las actuales cadenas costeras. Los fragmentos situados al otro lado de la dorsal, al oeste, se están hundiendo hacia el interior de la Tierra por debajo de América occidental, y han sido definitivamente separados de las cordilleras costeras. Éstas siguen sobre la placa del Pacífico y están siendo transportadas hacia el norte por el movimiento general de la misma.

Este esquema encaja perfectamente con las observaciones geológicas efectuadas en el norte de California, pero en el sur la situación es algo diferente. Parece ser que la expansión del fondo oceánico no se produjo de manera totalmente uniforme, sino que tuvo lugar según una serie de bandas paralelas; sería algo parecido a una batería de cintas transportadoras ligeramente desfasadas unas respecto a otras. La actividad expansiva de la banda situada en el sur se produjo de manera que la dorsal chocó oblicuamente contra México, permaneciendo activa durante un tiempo: el tiempo que tardó en separar un trozo del continente (la península de Baja California) del bloque principal. El movimiento hacia el norte de la placa del Pacífico ha comprimido ese trozo de continente contra la región de Los Ángeles, provocando la formación de las montañas de San Bernardino. Actualmente, la Baja California está pivotando en torno a dichas montañas, por lo que el Golfo de California se está abriendo; y más al norte, California tiende a separarse del resto del continente americano por la Falla de San Andrés y sus prolongaciones. Este desgarre es el origen de la profunda depresión del Mar de Salton.

La envergadura de este desplazamiento lateral o desgarre es impresionante. Desde el momento en que la dorsal expansiva y la fosa oceánica se aniquilaron la una contra la otra a lo largo de una línea actualmente representada por la Falla de San Andrés, han transcurrido unos 30 millones de años;

en esa época, "San Francisco" estaba mil kilómetros más al sur y el desgarre dextrógiro a lo largo del plano de falla continúa aún hoy en día a una tasa media de seis centímetros por año. Por tanto, la notable actividad tectónica de la región es fácilmente explicable en términos geofísicos. Pero las repercusiones de la destrucción de la dorsal y de la fosa se han dejado sentir en áreas más alejadas y mucho más grandes que la pequeña región californiana. Al hablar de los puntos calientes vimos como la dirección de deriva de la placa del Pacífico había cambiado bruscamente hace unas decenas de millones de años. Esta evidencia, junto con otras similares obtenidas a partir del estudio de distintas cadenas volcánicas, parece indicar que la placa del Pacífico recibió un fuerte impacto que desvió su trayectoria hacia el noroeste, aproximadamente en la misma época en que Norteamérica empezó a cabalgar a la dorsal expansiva. Esto es seguramente más que una simple coincidencia, y en realidad parece que la sacudida producida a raíz del solapamiento del continente sobre la dorsal afectó a toda la placa del Pacífico. Una vez más vemos hasta qué punto las placas interactúan entre sí y nos damos cuenta de la importancia que tiene considerar la deriva de los continentes desde un punto de vista global, incluso si lo que pretendemos explicar no son más que estructuras de ámbito local.

Las características de la Falla de San Andrés, considerada dentro de la escala temporal, son impresionantes. A lo largo de 700 millas, desde la frontera mexicana hasta la costa de Mendocino, la grieta se manifiesta mediante una alineación prácticamente continua de estructuras claramente visibles. Esas estructuras son de muy distintos tipos, y quizás por esa razón muy pocos californianos se dan cuenta de hasta qué punto la topografía de su estado es el resultado directo de la actividad tectónica a lo largo de la Falla de San Andrés. Sin embargo, dos de las características de la falla hacen que sea muy fácil percibir su presencia en el terreno; la primera de dichas características es que forma una línea prácticamente recta, de modo que si se ha perdido de vista la falla lo único que hay que hacer para reencontrarla es mirar hacia delante

en línea recta hasta ver la próxima estructura superficial relacionada con la misma; la segunda característica que delata la presencia de la falla es la existencia de morfologías anómalas, tales como la yuxtaposición de formas del relieve de distinto origen o la aparición de bruscos desniveles en el fondo de valles totalmente planos. Estas morfologías anómalas son el resultado de los movimientos de desgarre y de los deslizamientos que se producen a lo largo del plano de falla. El vuelo San Francisco-Los Ángeles permite seguir desde el aire el trazado de la falla a lo largo de las cordilleras costeras, pero su aspecto es aún más impresionante cuando se la observa desde tierra.

A continuación mencionaremos algunos de los principales signos de la actividad de la falla. El comportamiento de la falla varía considerablemente a lo largo de la misma; a grandes rasgos, puede considerarse que está formada por cinco segmentos distintos con una actividad lenta pero continua en tres de ellos. Los otros dos segmentos pueden permanecer quietos durante períodos de varios años, pero cuando se mueven lo hacen de forma muy brusca, dando lugar a grandes terremotos como el que en el año 1906 asoló San Francisco. Al norte del Cabo Mendocino, la falla se sumerge en el mar, en donde está en permanente actividad; entre el Cabo Mendocino y San Francisco es aún claramente visible la línea correspondiente a la sacudida del año 1906, la cual se solapa ligeramente con uno de los segmentos permanentemente activos, entre San Francisco y Parkfield. La línea del gran terremoto de 1857 se extiende desde Parkfield hasta San Bernardino, justo al este de Los Ángeles, delimitando el segundo segmento. Éste se caracteriza por movimientos ocasionales pero bruscos, y desde San Bernardino hasta el Golfo de California la falla presenta de nuevo movimientos lentos pero continuos. La falla es relativamente poco peligrosa en los segmentos en permanente movimiento, puesto que dicho movimiento relaja las tensiones con la misma rapidez con que se forman; en esos segmentos, las placas se deslizan a razón de unos cinco centímetros por año. Paradójicamente, las regiones actual-

mente más peligrosas son las que están quietas; a lo largo de la línea de la sacudida de 1857 se han ido acumulando los esfuerzos generados durante más de 120 años de actividad tectónica y, de cara a un futuro próximo, parece inevitable un terremoto que provoque un deslizamiento brusco de unos seis metros de largo. Pero la gente vive y trabaja despreocupadamente al lado mismo de la falla, e incluso se han atrevido a construir embalses, hospitales y escuelas en plena zona peligrosa.

Uno de los mejores indicadores naturales del arrastre continuo de la falla en tiempos recientes es un río que la atraviesa y cuyo curso se ha ido curvando paulatinamente. Debido al movimiento de la falla el río tiende a mantenerse siempre en el mismo cauce, sin abrir otros nuevos, de forma que las mitades este y oeste del río se van alejando progresivamente. Como resultado se ha formado un conjunto de cauces que se curvan fuertemente cuando cruzan la falla; un estudio del trazado de los cauces fluviales existentes en la zona activa central, al sur de San Francisco, ha mostrado la existencia, a lo largo de 110 kilómetros, de 130 ríos cuyos cauces están desplazados lateralmente como consecuencia del movimiento de la falla. En algunos casos, el desplazamiento relativo entre las dos mitades del río es de más de ¡300 metros! En las construcciones que cruzan la falla pueden verse efectos similares; por ejemplo, en la ciudad de Hollister, próxima a la Bahía de Monterrey, pueden verse aceras, tuberías y muros que han sido curvados a causa del persistente arrastre lateral de la falla. Las carreteras que cruzan la falla también están afectadas, tanto por el arrastre como por fenómenos de mayor envergadura. Una importante sacudida ocurrida en el año 1966 en la región cercana a Parkfield partió la carretera 46 coincidiendo aproximadamente con una de las líneas de demarcación de la calzada. El día de la sacudida (22 de junio) el desplazamiento producido fue de tan sólo unos cinco centímetros, pero como consecuencia de los movimientos de arrastre posteriores, el desplazamiento medido el día 4 de agosto ya era de más de 12 centímetros. Este sector de la

falla es particularmente interesante porque constituye una región de transición mal definida entre el segmento en arrastre continuo situado al norte y el segmento amenazadoramente quieto del sur; por tal razón, en dicho sector se producen ambos tipos de movimientos, es decir, sacudidas bruscas seguidas de movimientos de arrastre relativamente rápidos.

Hacia el sur de la región de San José se encuentra la misión de San Juan Bautista, la cual al parecer está situada en el extremo sur de la línea de rotura correspondiente al terremoto del año 1906, no muy lejos del segmento caracterizado por un arrastre continuo y situado aún más al sur. Cerca de Los Gatos, en la abandonada estación de tren de Wrights, las secuelas del terremoto de 1906 son manifiestas; en ese lugar, y coincidiendo con la entrada de un túnel, la vía está desplazada lateralmente 1,5 metros, inutilizada para el transporte. Desde la carretera que va a San Juan Bautista, la línea de la falla puede observarse muy claramente en algunos lugares, especialmente en un valle abierto a lo largo de la falla en el que la carretera discurre paralelamente al río y a la vía del ferrocarril. En el corte que forma la carretera en el paso de Chittenden pueden verse estratos de pizarras a un lado y granito al otro lado; el movimiento de la falla a su paso por ese lugar ha causado esta disposición anómala. A pesar de que los constructores de la carretera consideraron conveniente hacerla pasar por encima de la línea de la falla, cualquiera que conozca un poco la geofísica no podrá evitar sorprenderse cuando, al circular por el paso de Chittenden, piense que las dos ruedas de un lado del coche están sobre la placa norteamericana y que las dos ruedas del otro lado están sobre la placa del Pacífico; aunque acontecimientos como el terremoto del año 1906 realmente sólo se produzcan cada 100 años o más, no da la sensación de ser la carretera más segura del mundo.

En San Juan Bautista los constructores también han aprovechado la topografía debida a la falla; en esa ciudad la tribuna del rodeo local se apoya en el escarpado correspondiente a una antigua línea de la falla. Incluso la misión está

edificada en la cima de un escarpado; por eso no es de extrañar que se haya visto afectada tanto por el terremoto de 1906 como por otros importantes terremotos menos conocidos ocurridos a comienzos del siglo XIX.

Algo más al sur, el terremoto de 1906 no tuvo ninguna repercusión, pero uno de los más famosos ejemplos de los movimientos de arrastre continuado de la falla se encuentran en unos viñedos cercanos a Hollister. Este ejemplo fue descubierto en 1956, cuando alguien se apercibió de que las paredes de hormigón y las losas del suelo de un almacén se estaban rompiendo y doblando; entonces, los propietarios de los viñedos (conocidos como Viñedos de Almadén en la actualidad y reputados por la calidad de sus vinos) se dieron cuenta de que el almacén estaba construido precisamente encima de un ramal activo de la falla cuyo movimiento desplazaba las dos mitades del edificio a una tasa de un centímetro por año. En esa región existen bastantes ramales de la falla, prácticamente paralelos entre sí, a lo largo de los cuales se producen abundantes movimientos de desgarre dextrógiros, entre los que se reparte el desplazamiento total de los dos labios de la falla. Eso explica por qué el desplazamiento ocurrido en un año en cada ramal es menor que el desplazamiento relativo general de la falla maestra durante el mismo período de tiempo (unos cinco centímetros). Pueden verse muestras de la actividad de la falla en un canal de riego de hormigón que está atravesado por el mismo ramal de la falla. Este canal ha sido reparado en numerosas ocasiones, pero la falla sigue rompiéndolo y desplazándolo una y otra vez. En el año 1974, cuando visité el lugar, el edificio (construido en 1939 para sustituir un almacén anterior que se había derrumbado, por causas que ahora son obvias) todavía estaba en pie, pero no tenía el aspecto del tipo de estructura donde a mí me gustaría trabajar; tal vez haya tenido la misma suerte que su precursor, pero, en este caso, existen más pruebas de la actividad de la falla donde el mismo ramal atraviesa una zanja de drenaje de hormigón, al sur del edificio principal. Esta zanja tiene señales de repetidos remiendos, pero sigue rota y desplazada



Fig. 9. Vemos al autor examinando el canal de riego roto en los Viñedos de Almadén. (Reproducido con la autorización de John Faulkner.)

en la línea de la falla; además, representa una clara atracción turística, pues aparecieron, durante los pocos minutos que yo estuve ahí, dos grupos más de visitantes con sus máquinas de fotografiar a punto.

Podemos ver estos detalles de la actividad en la Falla de San Andrés porque es una falla joven. Pero si alguno piensa que los geofísicos ya han encontrado respuesta a todo y que tan sólo resta por integrar en sus modelos algunos pequeños detalles, está muy equivocado. El Great Glen, en Escocia, se encarga de recordarnos cuán limitados son nuestros conocimientos acerca del comportamiento tectónico de la Tierra. Mucho tiempo atrás, la Falla del Great Glen debió ser muy parecida a la de San Andrés, con los Highlands escoceses en el norte y los Lowlands en el sur deslizándose los unos respecto a los otros a lo largo de la falla. Pero, tal como están las cosas en la actualidad, no podemos ni tan sólo decir si los Highlands se deslizaron de oeste a este (desgarre dextrógiro) o de este a oeste (desgarre levógiro). Sin embargo, los argumentos más fidedignos parecen indicar que el desplazamiento lateral de los Highlands se produjo en sentido dextrógiro.

Estaba ampliamente aceptado que la línea de falla del Great Glen, que atraviesa Escocia en dirección sudoeste-noroeste, se había formado debido a movimientos verticales que habían roto la corteza terrestre a lo largo de una línea de debilidad en la misma. Sin embargo, en 1946, el geólogo W. Q. Kennedy postuló que la clave del proceso habían sido los movimientos horizontales. Por sí solo, el ejemplo escocés no bastaba ni para modificar las posturas del *establishment* ni para hacer que la teoría de la deriva continental ganase adeptos; pero cuando los conceptos de la tectónica de placas fueron mundialmente admitidos, el Great Glen se convirtió en un lugar idóneo para estudiar con detalle los procesos tectónicos en acción (a pesar de que no se conociese con certeza en qué sentido se habían producido los movimientos).

Irónicamente, las opiniones de Kennedy se basaban en evidencias geológicas que ahora nos parecen inaceptables. Observó que a uno y a otro lado del Great Glen existían unos

afloramientos de ciertos tipos de granitos que daban la impresión de haber formado un solo conjunto en algún momento; la disposición actual de los granitos podría ser explicada admitiendo que se hubiese producido un desplazamiento lateral de unos 75 kilómetros de longitud a lo largo de la falla; según dicho desplazamiento, que debió ocurrir hace unos 65 millones de años, los Highlands se habrían movido hacia la izquierda, es decir, hacia el suroeste. Al ser aceptada la posibilidad de la deriva continental, las ideas de Kennedy ganaron en credibilidad. Pero a comienzos de los años 70 fueron cuestionadas por dos miembros del Instituto de Ciencias Geológicas de Londres, los doctores M. S. Garson y J. Plant. Estos científicos dijeron que Kennedy había acertado cuando interpretó el Great Glen como una falla de desplazamiento lateral, pero se equivocó acerca de la dirección del movimiento. Según su opinión, los Highlands se habían desplazado en sentido contrario al indicado por Kennedy; por tanto, y mirándolos desde Gran Bretaña, se habrían movido hacia la derecha.

Esta nueva interpretación fue posible gracias al extraordinario incremento de datos geológicos disponibles acerca de Escocia y el Mar del Norte, muchos de los cuales eran, por supuesto, resultado de la intensa investigación petrolífera que se estaba llevando a cabo en esa parte del mundo. Los granitos de Foyers y Strontian estudiados por Kennedy dejaron de ser considerados como una buena referencia para interpretar el deslizamiento y, además, probablemente nunca formaron parte del mismo fenómeno (véase la figura 10). Garson y Plant acumularon una gran cantidad de evidencias procedentes tanto de estudios sobre el terreno como de los trabajos de reconocimiento de los fondos marinos próximos a Escocia. Estos reconocimientos demostraron que la falla se prolongaba en una y otra dirección, es decir, hacia el noreste y el suroeste, y revelaron además que las rocas situadas en el norte habían sido desplazadas hacia el este por el movimiento de la falla.

Los datos magnéticos, una de las nuevas áreas del estudio de la geofísica, han sido particularmente valiosos para este

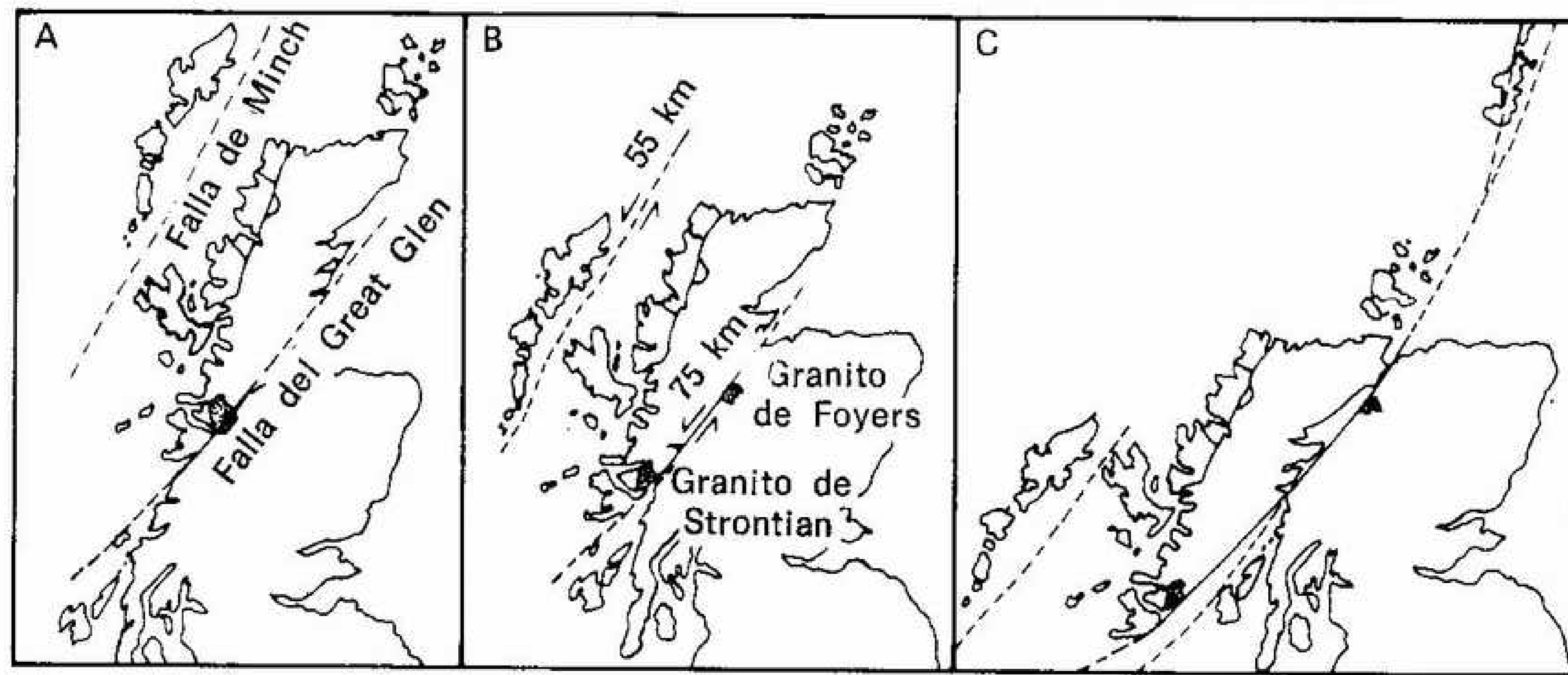


Fig. 10. Dos posibles reconstrucciones de Escocia. A) Antes de la traslación postulada por Kennedy. B) Situación actual con los granitos de Foyers y Strontian separados. C) Antes de la traslación según el esquema reconstruido por Garson y Plant. (Reproducido con la autorización del Dr. Jane Plant y de *Nature*.)

tipo de investigaciones. Aproximadamente unos veinticinco años después de la interpretación original de Kennedy, el doctor D. Flinn, de la Universidad de Liverpool, consiguió reconstruir satisfactoriamente el rompecabezas magnético del sector en el que la falla penetra en el mar y llegó a la conclusión de que el movimiento había sido dextrógiro, lo cual estaba en total contradicción con la opinión de Kennedy. Pero el Dr. Flinn no se atrevió a desacreditar la interpretación de Kennedy, por lo que durante unos años existió una cierta confusión debido a que los geólogos parecían aceptar que en algunos lugares del Great Glen el movimiento había sido hacia la derecha, mientras que en otros lugares habría sido hacia la izquierda.

Naturalmente, esta situación no podía durar, y la reconstrucción de Garson y Plant permitió no sólo salir del confusionismo creado, sino que incluso demostró que la Falla del Great Glen podía ser prolongada hasta el continente europeo y Norteamérica. Esta moderna interpretación considera que el Great Glen se formó a raíz de un importante desplazamiento (del orden de los 100 kilómetros) hacia el noreste de los

Highlands escoceses, hace unos 400 millones de años. En ese momento, el Océano Atlántico estaba empezando a formarse y los fragmentos de corteza continental que ahora conocemos con los nombres de Canadá y Groenlandia estaban muy cerca del bloque continental de los Highlands, que en aquel entonces debía ser tan grande como Inglaterra. Pero, ¿en qué se apoya este hecho?

Existen muchos sistemas de fallas en los Apalaches canadienses y en Terranova; puede que uno de ellos, el complejo de la Falla de Cabot, haya formado en otros tiempos un único complejo gigante juntamente con el Great Glen y la Falla de Leannan, en Irlanda, todo ello antes de que el Atlántico se abriese. La Falla del Great Glen también puede prolongarse hacia el noreste hasta enlazar con los sistemas de fallas transformantes de las Spitzbergen. A pesar de que los movimientos de las fallas escandinavas son aún mal conocidos, el sistema de Cabot también sugiere la existencia de un deslizamiento en dirección noreste y, además, hay numerosas evidencias de que antes de la formación del Océano Atlántico existió un sistema de fallas que se extendían a lo largo de 3.200 kilómetros (tan grande, pues, como el actual sistema de la Falla de San Andrés). Este sistema acoge desde los primitivos Apalaches hasta Escandinavia, pasando por Escocia. La actividad de la falla debe haber estado relacionada con el ensanchamiento del Atlántico, mientras que la actividad en la Falla de San Andrés es un primer signo de que el Océano Pacífico se está cerrando. Los Highlands de Escocia, por otra parte, son casi con certeza un fragmento de continente que quedó atrás cuando Norteamérica y Groenlandia se separaron de Europa.

A pesar de que el Great Glen es una falla antigua actualmente estable (sin movimientos de arrastre continuos en la actualidad), ofrece al visitante ocasional algunas ventajas respecto a la Falla de San Andrés. Debido a su antigüedad, el Great Glen ha sido intensamente modelado por los agentes erosivos y en él se han formado muchas depresiones actualmente ocupadas por una gran cantidad de lagos; el Canal

Caledoniano conecta unos lagos con otros, por lo que es posible seguir el curso de la falla, de costa a costa, en barca. El canal fue una de las grandes obras de ingeniería del siglo XIX, aunque nunca ha satisfecho plenamente los objetivos que motivaron su construcción. Los objetivos más importantes eran: favorecer el comercio con la región del Báltico, proporcionando a los barcos un paso seguro entre la costa este y la costa oeste escocesas; apoyar el desarrollo de la industria de salazones de la costa oeste; evitar la despoblación de los Highlands occidentales y tener una ruta de gran valor estratégico durante las guerras napoleónicas. Este último objetivo nunca fue alcanzado, ya que, a pesar de que Thomas Telford fue nombrado supervisor de los trabajos en 1800, el canal no se inauguró hasta 1822. Después de las reparaciones de la década de los 40, aún en el siglo XIX, el canal era utilizado por pequeñas embarcaciones de cabotaje que transportaban carbón, productos agropecuarios y materiales de construcción; pero a comienzos del siglo XX este estrecho canal salpicado de lagos y que salva un desnivel total de 32 metros había quedado obsoleto y desde entonces ha sido escasamente utilizado (exceptuando los períodos de las dos grandes guerras mundiales, durante las cuales se puso de manifiesto su valor estratégico).

Sin embargo, el Great Glen ya era importante para los Highlands mucho antes de que el Canal Caledoniano fuese ni siquiera concebido. Es, por supuesto, la falla más importante de todas las que atraviesan los Highlands en dirección noreste-suroeste, y la franja de terreno afectada por la misma se ha ido ensanchando paulatinamente por la acción de los glaciares y los ríos hasta convertirla en una auténtica barrera que divide Escocia en dos. La prolongación de la Falla del Great Glen es visible en el Mull y a lo largo de la línea de acantilados que va desde las Islas Black y la península de Tain hasta el Tarbat Ness; el valor estratégico de esta barrera en relación con las comunicaciones norte-sur durante los tiempos históricos es evidente. A fines del siglo XII, Guillermo el León construyó castillos en Edindour y Dunskaith en Ross-shire, Urquhart e Inverlochy con el fin de controlar el Great



Fig. 11. El Great Glen y el Lago Ness vistos desde Fort William. (Reproducido con la autorización de Aerofilms Ltd.)

Glen y asegurar la defensa de Argyll; estas obras formaban parte del esfuerzo de los celtas por extender su área de influencia más allá de los Grampianos, en oposición al Norse Lord de las islas, lo cual demuestra que hace 800 años los escoceses sólo controlaban una pequeña parte del territorio "escocés".

Debido al carácter accidentado del terreno, en los Highlands las carreteras se construyeron siguiendo el curso de los valles; sin embargo, el Great Glen no se convirtió en una vía de comunicación importante hacia Glasgow hasta el siglo XVIII, cuando se abrieron los caminos a través de los puertos de Glencoe y Rannoch Moor. El Great Glen también supuso una barrera en la expansión de las innovaciones tecno-

lógicas e industriales; hace 200 años, al norte del valle, el empleo de las "modernas" técnicas agrícolas era la única excepción que confirmaba la regla. La situación empezó a cambiar a partir del año 1715 con la llegada de los jacobitas; el general George Wade puso en marcha un amplio programa de construcción de caminos y carreteras con el fin de mejorar las comunicaciones y pacificar los Highlands. Estas carreteras aseguraban los enlaces entre las tres plazas fuertes del Great Glen y las plazas de Dunkeld y Crieff, situadas más al sur (actualmente estos enlaces forman parte de la carretera A9). A finales del siglo XVIII las carreteras militares pasaron a depender de la jurisdicción civil, pero aún durante una docena de años la anchura de muchas de las carreteras "principales" del norte y del oeste del Great Glen sólo permitía el paso de un carruaje, de tal modo que los cruces entre dos vehículos sólo podían realizarse en algunos lugares estratégicos. R. N. Millman señala en su libro *The Making of the Scottish Landscape* que, aunque pueda parecer un contrasentido, la mejora de las comunicaciones en los últimos años ha favorecido aún más el despoblamiento de los Highlands.

Pero los Highlands han padecido otros muchos tipos de sucesos, más fácilmente apreciables por el visitante mientras permanece a la sombra de las ominosas hileras de coníferas plantadas en el período de entreguerras. Aunque la Comisión de Bosques actúa según las técnicas modernas, estos testimonios de una política desacertada aún continuarán visibles durante algunos años. En el terreno de la ganadería se están rectificando lentamente las viejas equivocaciones y de nuevo es posible ver a las reses pastando en los valles, incluido el Great Glen, en áreas experimentales. El ganado vacuno pasta de forma menos selectiva que el ovino y su estiércol es de más calidad, ayudando así a alcanzar de nuevo el equilibrio ecológico en los lugares en los que se rompió a raíz de la introducción masiva de ovinos a finales del siglo XVIII.

Puede dar la impresión de que lo que acabamos de describir tiene poco que ver con la Falla de San Andrés. Sin embargo, en la Falla del Great Glen hay un elemento que constituye un buen ejemplo de cómo pueden evolucionar algunos sectores de la Falla de San Andrés si el movimiento de desgarre dextrógiro se detiene en un futuro próximo, dejando que la erosión continúe modificando el relieve de la región. El actual valle del eje del Great Glen es, en términos geológicos, un elemento reciente cuyo origen data de finales de la época Terciaria; antes, los ríos de los Highlands discurrían perpendicularmente a la línea de la falla y sus antiguos cursos están representados por pasos o gargantas elevadas. El Gour, por ejemplo, pasó por el collado de Glencoe; el Eil discurría por Glen Nevis y el Arkaig por el Spean Valley. Pero la línea de falla favoreció la formación de cursos que enlazaban unos ríos con otros y que canalizaban las aguas a lo largo de la falla. En términos geológicos, este proceso se conoce con el nombre de "captura". Si el movimiento de las placas se detiene, en San Andrés se producirán inevitablemente capturas, especialmente en los lugares en los que los cursos de los ríos afectados por la falla ya forman en la actualidad curvas muy pronunciadas, con parte de los mismos circulando a lo largo de la línea de la falla. Cuando el sistema de capturas ya está bien desarrollado, se produce una rápida erosión de la línea de falla, facilitada por la trituración tectónica de las rocas allí existentes; los ríos excavan a su vez con gran rapidez (en el Great Glen han excavado los profundos surcos sobre los que se instalan los actuales lagos). Uno de los efectos colaterales de este proceso es que la circulación actual de los ríos del extremo sur del Great Glen discurre "al revés", es decir, hacia el interior del valle, ya que cuando la erosión excavó el valle hasta niveles situados por debajo de las cotas de los antiguos ríos, en éstos se invirtió el sentido de circulación de las aguas. Las profundidades alcanzadas por este tipo de erosión son impresionantes; el Lago Lochy tiene 163 metros de profundidad y el Lago Ness 232 metros, con el punto de máxima profundidad situado a 215 metros por debajo del nivel del mar.

En los dos ejemplos seleccionados, la Falla de San Andrés y el Great Glen, se ha podido ver que el conocimiento de la tectónica global constituye una ayuda muy valiosa para inter-

pretar estructuras de orden regional. Naturalmente, el estudio de esas estructuras también sirve para perfeccionar el modelo global. Pero aún en muchos casos, como por ejemplo en la búsqueda de reservas de petróleo, el modelo global es quien proporciona las respuestas buscadas. Si se considera el elemento humano como uno de los factores más importantes del proceso nos damos cuenta de la importancia que tienen dichos modelos, no sólo para la actual sociedad, sino incluso para comprender la evolución del hombre y de su civilización.

VIII. DERIVA CONTINENTAL, EVOLUCIÓN Y PERÍODOS GLACIALES

La civilización humana se ha desarrollado a partir del final de la última edad de hielo, hace unos 15.000 años, y ello ha ocurrido fundamentalmente en latitudes altas, al norte del Trópico de Cáncer. Está ampliamente aceptado que los períodos glaciales han jugado un papel primordial en la constitución del hombre como especie dominante sobre la Tierra; el frío provocó la desaparición de las criaturas que no supieron adaptarse. En cambio, la extraordinaria adaptabilidad del hombre le permitió sobrevivir bajo unas condiciones climáticas difíciles y cambiantes. Si esta teoría es correcta, podemos decir que en parte debemos nuestra existencia a la estructura de la galaxia (desarrollada en el capítulo 1), pero sin duda también desempeñó un papel muy importante el proceso de la tectónica de placas. En la actualidad, y también durante la historia geológica más reciente, los continentes están concentrados en el hemisferio Norte y su distribución favorece que sobre ellos se dejen sentir los efectos de las grandes glaciaciones, iniciadas cuando algún mecanismo desencadenante –como por ejemplo un fenómeno astronómico– provoca un ligero enfriamiento.

Los hielos del Océano Ártico pueden extenderse fácilmente porque dicho océano está prácticamente rodeado de tierra que impide la penetración de las corrientes de aguas cálidas hacia el interior del mismo. Durante el invierno, las tierras circundantes se cubren de una delgada capa de nieve en

cuya superficie se refleja la mayor parte de la radiación solar que llega a esos lugares. Es fácil imaginar que si se produce un ligero cambio de las condiciones climáticas la capa de nieve acumulada en las latitudes altas puede persistir durante todo el verano, reflejando la radiación solar y por tanto impidiendo el calentamiento de la región. A su vez, este proceso favorecerá un enfriamiento cada vez mayor, por lo que la capa de nieve irá aumentando paulatinamente de espesor. El resultado final será la aparición de una nueva edad de hielo. Lo que acabamos de exponer no deja de ser una simplificación de la realidad, pero se ajusta bastante a lo que ocurre. Algunos cálculos detallados acerca de los cambios en la reflexión de la Tierra, suponiendo varias distribuciones diferentes de los continentes, han demostrado que si todas las tierras estuviesen concentradas en un cinturón alrededor del ecuador la temperatura podría ser 12 °C más alta de lo que es en la actualidad, con las tierras y los casquetes polares concentrados cerca de ambos polos y produciendo una reflexión mucho mayor. Entre otros cambios causados por la deriva continental, es posible que los movimientos de las placas fuesen lo bastante importantes como para provocar cambios climáticos que condujesen a la extinción de los grandes dinosaurios; estos animales no habrían podido adaptarse a unas condiciones distintas de aquellas bajo las que vivieron durante 200 millones de años caracterizados por unas temperaturas cálidas y una gran abundancia de comida. Estas ideas son aún un tanto especulativas, pero no por ello dejan de ser plausibles. Hay también un par de ideas fuertemente atractivas, acerca de cómo la evolución puede haber sido afectada por otro proceso geofísico: las repetidas inversiones del campo magnético terrestre.

La primera posibilidad es que este proceso haya tenido un efecto muy directo sobre la evolución. Actualmente, el campo magnético terrestre nos protege de las radiaciones cósmicas cargadas de partículas que surcan los espacios siderales; pero en las fases de inversión magnética el campo va disminuyendo progresivamente hasta anularse por completo: en esta situación la coraza magnética protectora desaparece. Un incremento del nivel de radiación cósmica en la superficie de la Tierra podría ser mortal para algunas especies, aunque esto parece poco probable. También podría alterar el material genético de muchas otras provocando un incremento en la tasa de mutaciones. Cuanto mayor es la tasa de mutaciones genéticas, mayor es la tasa de evolución biológica; esto podría explicar la existencia de períodos en los que se produce un rápido desarrollo de las poblaciones animales y vegetales de la Tierra, contrastando fuertemente con fases de estabilidad cuya duración es del orden de decenas de millones de años. Sin embargo, algunas mediciones han mostrado que el campo magnético sólo detiene en la actualidad, aproximadamente, el 14 % de la radiación, y que en cualquier caso sólo una de cada veinte mutaciones genéticas humanas se debe a las radiaciones (considerando simultáneamente a las de origen cósmico y a las procedentes de los materiales radiactivos de la propia Tierra). Estos hechos hacen que la teoría que acabamos de exponer sea difícilmente creíble.

No obstante, el estudio del registro fósil indica que algunas especies desaparecieron durante las inversiones geomagnéticas. Esta constatación ha llevado a los científicos a desarrollar una teoría algo más complicada que la anterior, pero bastante más plausible. Ésta remite de nuevo a los cambios climáticos, ya que sugiere que las desapariciones del campo magnético terrestre durante las inversiones favorecen la aparición de edades de hielo. Naturalmente, el *quid* de la cuestión consiste en explicar el porqué de las relaciones entre uno y otro proceso y para ello se han formulado dos hipótesis. La desaparición temporal del magnetismo terrestre podría ir acompañada por cambios en la ionización de la atmósfera superior, los cuales podrían afectar a la capa de ozono vital (acerca de la que tratará el capítulo 9) y la circulación atmosférica; todo ello provocaría un brusco cambio climático. Según la segunda hipótesis, las inversiones del campo magnético terrestre están acompañadas de un incremento de la actividad volcánica; el polvo volcánico que flotaría en la at-

mósfera impediría la penetración de la radiación solar y la Tierra se enfriaría bruscamente.

La vaguedad de estas formulaciones muestra las grandes dificultades con que tropiezan los científicos cuando intentan relacionar los procesos geofísicos a largo plazo con la historia del hombre y, en general, con la vida sobre el planeta. Es posible que todas estas teorías tengan algo de verdad, pero ningún proceso es suficiente por sí solo para alterar sustancialmente el equilibrio natural. Por ejemplo, en los últimos cuatro millones de años se han producido veinte inversiones magnéticas (y anteriormente se habrían producido muchas más), pero no hay ninguna evidencia de que cada inversión esté acompañada por cambios en el registro fósil o por importantes alteraciones climáticas. Es probable que cuando varios factores actúan simultáneamente se produzca un cambio significativo en las poblaciones o en el clima, pero sería muy raro que todos estos factores actuando a la vez provocasen un cambio tan brusco como el que representó la extinción de los dinosaurios. Sin embargo, incluso aceptando que nuestro conocimiento de lo acaecido antes de ese 1,5 % de la historia de la Tierra al que llamamos Cenozoico sea bastante confuso, algunas de esas ideas generales pueden servir para que nos demos cuenta de la importancia que desde el punto de vista humano han tenido los eventos ocurridos en los últimos 70 millones de años. Como ejemplo, valdría la pena estudiar con mayor detalle la relación entre la actividad volcánica y el clima; también hay muchas evidencias que muestran cómo los movimientos de deriva continental más recientes han afectado a la evolución de ciertas especies.

Las cenizas volcánicas se encuentran sedimentadas en muchas capas en diferentes partes del mundo y la relación entre fases de actividad volcánica generalizada y enfriamientos a escala global es bastante clara, especialmente si nos fijamos en el pasado más reciente y en los últimos dos millones de años. El neozelandés Dr. J. M. Bray ha estudiado este tipo de relación durante los últimos 40.000 años, edad que representa el límite de utilización de la precisa técnica de datación del carbono-14. A finales de 1974 presentó sus descubrimientos y demostró, a partir de la datación de varias muestras de rocas volcánicas, que las erupciones volcánicas tendían a ocurrir aproximadamente en el mismo momento en distintas partes del mundo alejadas entre sí. En particular, muchas erupciones prácticamente sincrónicas se habían producido en Japón, en el sur de Sudamérica y en Nueva Zelanda en diversas ocasiones durante los últimos 40 milenios. Durante esa época se han producido en Sudamérica ocho grandes oleadas de actividad volcánica, y las ocho coinciden con otras tantas erupciones en el Japón; de igual manera seis de esas ocho olas mayores coinciden con seis de las erupciones volcánicas ocurridas en Nueva Zelanda. Además, las erupciones y otros eventos menores en cada una de las regiones consideradas pueden relacionarse fácilmente con la aparición de una glaciación.

En términos tectónicos estos descubrimientos son interesantes incluso en el caso de que no existiese ninguna relación entre las erupciones y los cambios climáticos. Las tres regiones citadas por el Dr. Bray se encuentran en los límites de la placa del Pacífico, y da la impresión de que los esfuerzos acumulados en la corteza terrestre han provocado fracturas, vulcanismo y actividad sísmica de manera simultánea en distintos lugares situados en los bordes de dicha placa.

Retrocediendo 41.000 años, hasta los límites de fiabilidad de la datación con carbono-14, el Dr. Bray encontró que las grandes erupciones se producían justo antes de un importante avance de los casquetes polares. En los últimos 17.200 años, se han producido dieciocho fases de actividad volcánica relacionadas con avances glaciales, y en cuatro de estos casos el desfase entre el período de actividad volcánica y la progresión del hielo es de 100 a 300 años. Parece probable que estos desfases constituyan la clave de los procesos climáticos que determinan el crecimiento de las masas de hielo; no obstante, la discusión acerca de los complejos detalles de los procesos de cambio climático queda fuera de las intenciones de este libro.

Dos meses después de que el análisis del Dr. Bray acerca de la actividad volcánica fuese publicado en la revista *Nature*, los oceanógrafos estadounidenses Prof. J. Kennett y R. Thunell publicaron en *Science* un estudio global del vulcanismo de los últimos 20 millones de años. Sus investigaciones ofrecían una visión más amplia de los cambios detallados analizados por el Dr. Bray, y además permitieron profundizar en las causas de las glaciaciones más recientes. Tal vez pueda extrañar el hecho de que los oceanógrafos se ocupen de estas cuestiones. La explicación es simplemente que los sedimentos de los fondos oceánicos constituyen el mejor registro del nivel mundial de actividad volcánica, y ello es debido a que los procesos hidrosedimentarios se encargan de mezclar el polvo volcánico procedente de diversas partes del mundo; por lo que no se dejan sentir las influencias locales debidas a la existencia de volcanes en las áreas cercanas. Los sedimentos estudiados por el equipo estadounidense fueron obtenidos en el curso de un proyecto oceanográfico de alcance mundial, el "Deep Sea Drilling Project" (D.S.D.P.); en él se efectuaron perforaciones en 320 estaciones distribuidas entre todos los océanos, exceptuando el Ártico. Los científicos americanos estudiaron las capas superiores de sedimentos, correspondientes a los últimos 20 millones de años, puesto que en ellas se encuentran los sedimentos que pueden ser identificados y datados con mayor facilidad. En la figura 12 están expresados los cambios en el nivel de actividad volcánica revelados por la medición de la distribución de polvo volcánico en dichos sedimentos. El brusco incremento del vulcanismo durante los últimos dos millones de años concuerda muy bien con la aparición del período glacial más reciente. A pesar de que las proporciones de polvo volcánico en los sedimentos oceánicos varían de un lugar a otro, todos ellos muestran este incremento relativamente reciente de la actividad volcánica.

Algunas evidencias obtenidas en tierra firme apoyan la idea de que los dos últimos millones de años han sido especialmente activos en cuanto a vulcanismo se refiere, y no parece que existan argumentos en contra de la conclusión a que

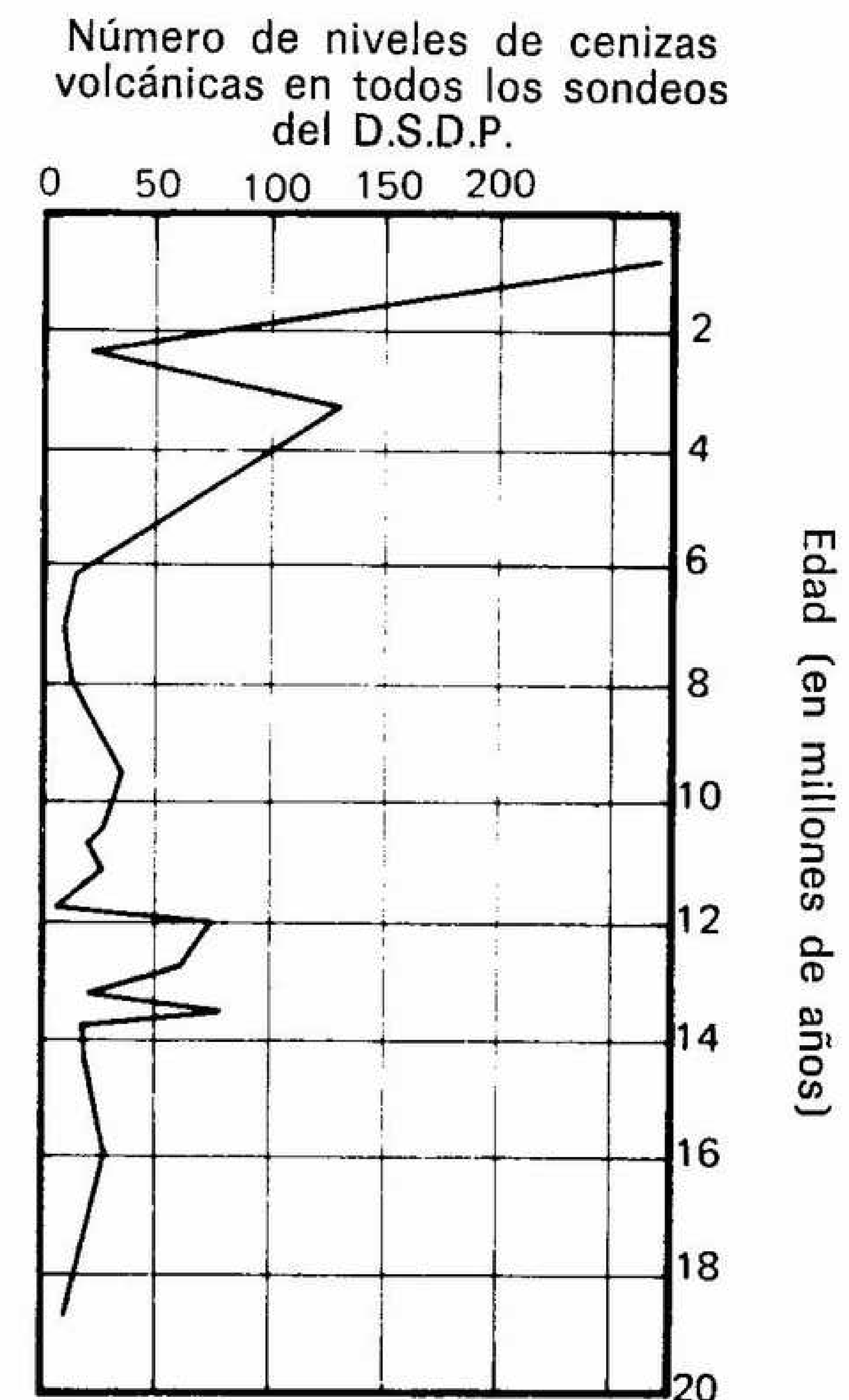


Fig. 12. Variaciones en la cantidad de cenizas volcánicas depositadas durante los últimos 20 millones de años (según J. P. Kennett y R. C. Thunell, *Science*, vol. 187, 1975, págs. 497-503).

llegaron los científicos americanos según la cual «el incremento de la actividad volcánica durante el Cuaternario coincide ... con la época del Cenozoico caracterizada por unos cambios climáticos más importantes y más rápidos». Sin embargo, los resultados del D.S.D.P. son demasiado genéricos para aclarar las relaciones específicas entre las erupciones volcánicas y la progresión de las masas de hielo. Además, a pesar de que el trabajo efectuado por el Dr. Bray muestra que una actividad volcánica acelerada puede provocar la extensión de los hielos,

también es cierto que a veces los hielos han progresado sin que hayan indicios de una actividad volcánica especialmente relevante. Y no es menos cierto que en algunos casos la actividad volcánica no implica en absoluto la progresión de los mantos de hielo. Incluso se podría teorizar sobre el caso contrario y decir que la actividad volcánica ha sido inducida por la repetida carga y descarga de la corteza terrestre por las masas de hielo; en tal caso la distribución de las capas de cenizas volcánicas en los testigos de los fondos oceánicos podría ser debida a las fluctuaciones climáticas. Por tanto, la actividad volcánica no explicaría las glaciaciones, sino que sería exactamente todo lo contrario. Incluso podría pensarse si un proceso no alimenta al otro y viceversa; es decir, cuando aumenta la cantidad de polvo volcánico o la extensión de los hielos se produce un enfriamiento a través del cual la progresión de los hielos provoca más vulcanismo que contribuye a enfriar aún más la temperatura, y así sucesivamente. Sea cual sea la verdad, hay un hecho claro: es imposible solucionar las cuestiones de interés humano planteadas por las ciencias de la Tierra dividiéndolas en rígidos apartados. Por ejemplo, cuando nos ocupábamos de la tectónica de placas nos convenía ignorar la mayor parte de las interacciones entre la Tierra sólida, la atmósfera y los océanos, tal como hemos ido haciendo a lo largo de la mayor parte de este libro. Pero cuando se trata de aplicar nuestros conocimientos a la resolución de problemas prácticos, necesitamos tomar en consideración muchas ramas diferentes de las ciencias de la Tierra, así como las interacciones entre las mismas. Sólo de este modo obtendremos una visión clara de lo que está ocurriendo en la naturaleza.

Es cierto que si bien el polvo volcánico juega un papel significativo en los cambios climáticos, sólo puede producir un efecto realmente importante cuando se dan las condiciones adecuadas. Por ejemplo, se conoce desde hace mucho tiempo que la inclinación del eje terrestre –responsable de las diferencias entre las estaciones– no es constante, sino que varía en mayor o menor grado de un año a otro; eso explica por qué

en algunos años determinados hay pocas diferencias entre el invierno y el verano, mientras que en otros las diferencias son extremas. Dada la actual distribución de los continentes, los veranos fríos en el hemisferio Norte favorecen la progresión del hielo debido a que la nieve acumulada durante el invierno no se funde fácilmente. Y los veranos fríos en el hemisferio Norte siempre coinciden con inviernos muy rigurosos en el hemisferio Sur, los cuales favorecen asimismo la progresión de los hielos marinos, conduciendo todo ello a unas condiciones climáticas cada vez más cercanas a las imperantes en las épocas glaciales. Estudiando toda la historia de la Tierra podemos darnos cuenta de que las épocas glaciales no son un fenómeno muy corriente, por lo que se reafirma la opinión de que los últimos dos millones de años han sido excepcionales en este sentido. Por todo ello no es demasiado extraño pensar que los grandes períodos glaciales se producen cuando los continentes están en el lugar apropiado, cuando la inclinación de la Tierra contribuye en el sentido propicio y cuando el Sistema Solar ocupa el lugar adecuado en la galaxia; y, *además*, surge un período de intensa actividad volcánica. La combinación de al menos un par de esos factores puede desencadenar el proceso, pero es dudoso que las variaciones en uno solo de estos procesos puedan explicar los cambios climáticos de nuestro planeta.

Una vez trazada esta breve panorámica acerca de las complejidades de los cambios climáticos, es importante estudiar el efecto de la deriva de los continentes sobre el desarrollo de las especies que han sido separadas de sus antepasados familiares por los procesos de apertura de nuevos océanos. Alfred Wegener ya sustentaba sus ideas acerca de la deriva de los continentes en las grandes similitudes entre los fósiles hallados en Brasil y África. Éste fue –y sigue siendo– un argumento mucho más persuasivo que la fácil concordancia entre las líneas de costa de uno y otro lado del Atlántico Sur. A comienzos del siglo XVIII estas similitudes se explicaban mediante la existencia de "puentes terrestres" que en otro tiempo habrían comunicado unos continentes con otros, pero que ahora

se habrían hundido bajo los océanos. Naturalmente, esta teoría ha sido arrinconada a la luz de los modernos descubrimientos que han mostrado que el espesor de la corteza oceánica es mucho menor que el de la corteza continental, entre otras muchas evidencias en favor de la deriva continental. Actualmente, en lo que constituye un interesante ejemplo de cooperación y beneficio mutuo entre diversas especialidades, los estudios paleontológicos facilitan enormemente la datación de la abertura de los continentes y los procesos de la deriva continental ayudan a los paleontólogos a comprender mejor la diversificación de las especies.

La evolución y la distribución de los animales terrestres están afectadas fundamentalmente por dos factores: el clima y la existencia de barreras acuosas, especialmente en los océanos. Los paleontólogos reconocen tres categorías en las rutas de dispersión mediante las cuales los animales pueden desplazarse desde sus regiones de origen; aunque esta clasificación sólo se aproxima a grandes rasgos a la realidad, es lo suficientemente ilustrativa acerca de los riesgos con que pueden encontrarse las poblaciones durante sus desplazamientos. La primera categoría, los "pasillos", permite a los animales migrar libremente en direcciones opuestas, y el enlace entre Norteamérica y Sudamérica es un ejemplo de ello. La segunda categoría, los "puentes selectivos", permite el movimiento de ciertas especies pero impide el paso de otras. El enlace entre Norteamérica y Asia durante el Pleistoceno es un ejemplo de esta categoría de ruta de dispersión; sólo los animales capaces de resistir los fríos de las regiones nórdicas fueron capaces de cruzar lo que hoy en día es el estrecho de Bering. La tercera categoría cubre la posible intervención del azar: son las "rutas casuales". A esta categoría se acogen las pocas criaturas capaces de atravesar las barreras acuosas viajando encima de objetos flotantes. Puesto que sólo un número muy reducido de criaturas son capaces de viajar de este modo, la fauna de muchas islas tiene unas peculiaridades únicas; en las islas que no han estado afectadas por el curso principal de la evolución pueden existir aún animales que ya están extinguidos en el resto del mundo. Eso se debe a que las criaturas que les han ido desplazando de sus nichos ecológicos en el resto del mundo nunca han alcanzado las islas, que se han convertido así en sus "santuarios". El mejor ejemplo de este tipo de sucesos lo constituye la fauna de Australia, una gran masa de tierra que ha estado separada del resto del mundo durante largo tiempo.

En términos genéticos, la deriva continental afecta fundamentalmente de dos maneras a las poblaciones. Cuando un continente se parte, se produce la división de una población uniforme, y cada una de las dos mitades empieza a seguir su propio camino evolutivo, es decir, se diversifican paulatinamente. Pero cuando dos continentes chocan, las faunas de las dos regiones empiezan a interactuar y a homogeneizarse, produciéndose también la desaparición de algunos grupos que no pueden resistir a los competidores recién encontrados. El ejemplo clásico de una convergencia no es, de hecho, el resultado de la deriva continental, pero es tan claro que no se debe pasar por alto.

Durante un largo período no existía conexión entre Norteamérica y Sudamérica, a pesar de que ambos continentes ocupaban unas posiciones relativas parecidas a las que ocupan hoy en día. El istmo de Panamá se formó a finales del Plioceno, posibilitando así las migraciones en ambas direcciones (un "pasillo"); en ese momento, en el sur vivían veintinueve familias de mamíferos y en el norte, veintisiete. Durante los últimos tres millones de años, las dos poblaciones se han mezclado. Muchos mamíferos del norte se han desplazado hacia el sur, mientras que el armadillo se ha extendido hacia el norte, y actualmente los dos continentes comparten veintidós familias de mamíferos.

Al mismo tiempo que el istmo de Panamá unió dos continentes, también separó los océanos Atlántico y Pacífico. En consecuencia, las poblaciones marinas de aguas poco profundas de uno y otro lado del istmo empezaron a diverger; por ejemplo, muchos moluscos del Caribe son actualmente sensiblemente diferentes de sus primos del Pacífico, a pesar de que

aún son manifiestas las relaciones entre unos y otros. Este modelo complementario de divergencia entre las criaturas marinas y de convergencia entre las criaturas terrestres como resultado de la formación de nuevos puentes entre dos continentes (con las consecuencias contrarias cuando dichos puentes se rompen) permite contrastar y datar por vía doble el registro fósil y los eventos tectónicos. Pero como aún no conocemos con mucha precisión cuánto tiempo es necesario para que los procesos evolutivos produzcan un grado apreciable de diversificación en poblaciones divididas, no podemos precisar mucho las edades de los cambios evolutivos. Actualmente, los paleontólogos están tratando de establecer relojes evolutivos más precisos en aquellos lugares del mundo en que los métodos geofísicos han permitido datar con precisión el momento de la rotura de las conexiones entre dos masas de tierra; los resultados que se obtengan deberán permitir datar las roturas de las conexiones en los lugares en que los métodos geofísicos no han dado una respuesta lo bastante precisa. Sin embargo, al menos una criatura ha sido capaz de sustraerse a los efectos de la expansión de los fondos oceánicos durante 70 millones de años. El desarrollo evolutivo de la tortuga verde es un caso bastante especial de interacción entre la deriva continental y la evolución, y aclara algunos aspectos de la moderna teoría acerca de la evolución del Atlántico Sur; es una historia fascinante que merece ser descrita.

Una familia de tortugas verdes la *Chelonia mydas*, vive en las costas del Brasil pero desova en la isla de Ascensión, situada a 2.000 kilómetros de distancia, en pleno Océano Atlántico ecuatorial. Las migraciones que efectúan estas tortugas han intrigado durante muchos años a los científicos; pero el Dr. Archie Carr de la Universidad de Florida y el Dr. Patrick Coleman de la Universidad de Australia Occidental han resuelto el enigma planteándolo en términos de la expansión de los fondos oceánicos. Presentaron su teoría en un memorable artículo publicado en *Nature* en la primavera de 1974.

No hay duda alguna de que la razón principal por la cual las tortugas prefieren las costas insulares para reproducirse es

porque allí no hay depredadores que se coman los huevos; o por lo menos, no hay tantos como en las zonas en las que las tortugas suelen vivir. Pero un viaje de 2.000 kilómetros es algo más largo del que suelen realizar otras familias de tortugas para ir a desovar en las playas insulares; además, este viaje lleva a la *Chelonia mydas* justo al lado de la dorsal expansiva del centro del Océano Atlántico. Y ahí parece radicar la clave de la odisea de estas tortugas. Según las últimas teorías acerca de la expansión de los fondos oceánicos, la abertura del Atlántico ecuatorial y la separación de Sudamérica y África son el resultado de una serie de episodios escalonados. Hace unos 110 millones de años (o quizás un poco antes), se formaron los valles de rift; a continuación, hace unos 80 ó 90 millones de años, los valles fueron progresivamente inundados en varias fases por las aguas de los océanos que se iban abriendo en el norte y el sur; finalmente, hace 70 millones de años, los dos océanos se unieron y sus respectivas dorsales expansivas pasaron a formar un único sistema continuo. En ese momento, la región ecuatorial del nuevo océano era aún muy estrecha, como una especie de canal salpicado por un gran número de islas.

Los paleontólogos saben, gracias al registro fósil, que ese canal oceánico estaba habitado por tortugas y, a pesar de que no haya podido ser demostrado, es bastante razonable suponer que algunas de esas tortugas hayan sido los antecesores de la *Chelonia mydas*. Sin embargo, la propia isla de Ascensión sólo tiene unos cuantos millones de años de antigüedad, por lo que es altamente improbable que hace 70 millones de años los antecesores de las tortugas actuales pudiesen desovar en ella. Pero la isla Ascensión es la última de una serie de islas volcánicas formadas por la actividad de la dorsal expansiva, y su predecesora más inmediata se encuentra debajo del nivel del mar a unos cincuenta kilómetros al oeste. Según las teorías acerca de la tectónica de placas expuestas a lo largo de este libro, la propia actividad expansiva de las dorsales va desplazando lateralmente hacia los lados a las islas volcánicas formadas sobre sus ejes o en su proximidad y hundiéndolas

progresivamente hasta quedar las islas bajo el nivel de las aguas. Al mismo tiempo, van naciendo nuevas islas como consecuencia de la actividad volcánica asociada a la dorsal y, en ocasiones, a posibles puntos calientes. La situación recuerda a la de la cadena hawaiana, aunque en el Atlántico las islas eran más grandes y se mantenían bastante tiempo por encima del nivel de las aguas. Hace 70 millones de años, las islas volcánicas de la dorsal medio-atlántica sólo estaban a 300 kilómetros de las costas de Sudamérica (asumiendo una tasa de expansión constante de dos centímetros por año durante todo el proceso de abertura del Océano Atlántico). Un viaje de unos pocos cientos de kilómetros no constituía un problema grave para las tortugas, las cuales se iban reproduciendo año tras año en las islas del canal sin que sus primitivos cerebros se apercibiesen de la pesada herencia que estaban transmitiendo a sus descendientes.

Por el momento, no hay ninguna prueba definitiva de la existencia de una cadena continua de islas volcánicas sumergidas –montañas submarinas– entre Ascensión y las costas del Brasil, pero los dos extremos de esa supuesta cadena sí que han sido identificados en los fondos oceánicos y hay pocos argumentos que hagan dudar de la existencia de los restantes eslabones de la cadena. Como la expansión se produce aproximadamente en dirección este-oeste y las tortugas han de migrar según una latitud prácticamente constante, el único cambio importante que la deriva continental ha introducido en sus viajes es que el trayecto ha ido alargándose a medida que las islas más antiguas, hundiéndose bajo el mar, han sido sustituidas por otras nuevas cada vez más alejadas. La continuación de la expansión oceánica a una tasa aparentemente tan pequeña como son dos centímetros por año, pero continua a lo largo de 70 millones de años, ha alargado el viaje de las tortugas hasta la cifra actual de 2.000 kilómetros.

Por otro lado, la migración está facilitada enormemente por los cambios naturales en la posición del Sol naciente durante las ocho semanas de duración del viaje. Para las tortugas que abandonan las costas del norte del Brasil en diciembre, el Sol naciente traza una línea recta que las conduce inicialmente en dirección este-sureste. Por la noche, las tortugas descansan y con cada nuevo amanecer van desviando su rumbo ligeramente, ya que el Sol sale cada día un poco más al norte. Un par de meses más tarde, las tortugas alcanzan un punto situado "aguas abajo" de la isla de Ascensión, pero dentro de la Corriente Ecuatorial, en la cual olfatearán alguna señal química procedente de la isla que las conducirá a ella. Podría ocurrir que la próxima isla "Ascensión" emergiese antes de que la vieja isla se hundiese bajo las aguas, ofreciendo a las tortugas durante un cierto tiempo la posibilidad de escoger entre uno y otro lugar de puesta; evidentemente, las tortugas se encontrarían con un grave problema si la vieja isla desapareciese antes de que naciese su sustituta, y es difícil prever de qué manera podrán continuar sus migraciones en los próximos millones de años si el Atlántico continúa ensanchándose sin cesar. Es posible que éste sea un ejemplo único de la adaptación de una especie ante los problemas derivados de la expansión de los fondos oceánicos. Si en verdad la actual familia de *Chelonia mydas* ha heredado este modelo de conducta hace más de 50 millones de años, es evidente que ha transcurrido un lapso de tiempo lo bastante amplio para que la selección natural haya conducido a la especie hasta su forma actual, caracterizada por unos músculos natatorios enormes y un gran depósito de grasa, indispensable para llevar a cabo las migraciones periódicas. Además de ser una especie que ha evolucionado hasta la forma actual fundamentalmente a causa de sus viajes migratorios, estas tortugas verdes nos previenen contra la clasificación de las especies de nuestro planeta basada únicamente en su morfología exterior. Éste puede ser un caso externo, pero todos los animales del planeta, incluido el hombre, han sido afectados por los cambios geográficos y climáticos (a menudo, coincidiendo ambos tipos de cambios en un mismo momento). Somos en realidad las criaturas de un pequeño planeta, que es nuestra casa en el espacio: la astronave terrestre.

IX. LA ASTRONAVE TERRESTRE

Acabamos de ver cómo está estructurado el interior de la Tierra y cómo los esfuerzos tectónicos acumulados en las capas exteriores mueven las placas corticales, produciendo el fenómeno que se conoce bajo el nombre de deriva continental. Pero si se considera a la Tierra como un planeta en el espacio, nos daremos cuenta de que posee una envoltura externa que rodea a la propia corteza sólida: nos referimos a la biosfera. La quilla de la astronave terrestre no es su superficie sólida sino la magnetosfera, que constituye el límite superior de la atmósfera y delimita la zona de influencia del campo magnético de nuestro planeta. A pesar de la importancia de los océanos, el hombre es aún hoy en día un animal esencialmente terrestre, y los conocimientos que se poseen acerca de los océanos siguen siendo muy reducidos. Este capítulo está dedicado a la descripción de las capas exteriores de la astronave terrestre –las regiones habitadas– a partir de la atmósfera.

La estructura estratiforme de la atmósfera de la Tierra se pone de manifiesto analizando las variaciones de la temperatura con la altitud (fig. 13). La fuente de energía que calienta la atmósfera es fundamentalmente el Sol, aunque también existe una pequeña proporción de calor procedente del interior de la Tierra. Algunas radiaciones solares son reflejadas de nuevo hacia el espacio en el techo de la atmósfera; las longitudes de onda ultravioletas e infrarrojas son absorbidas en las

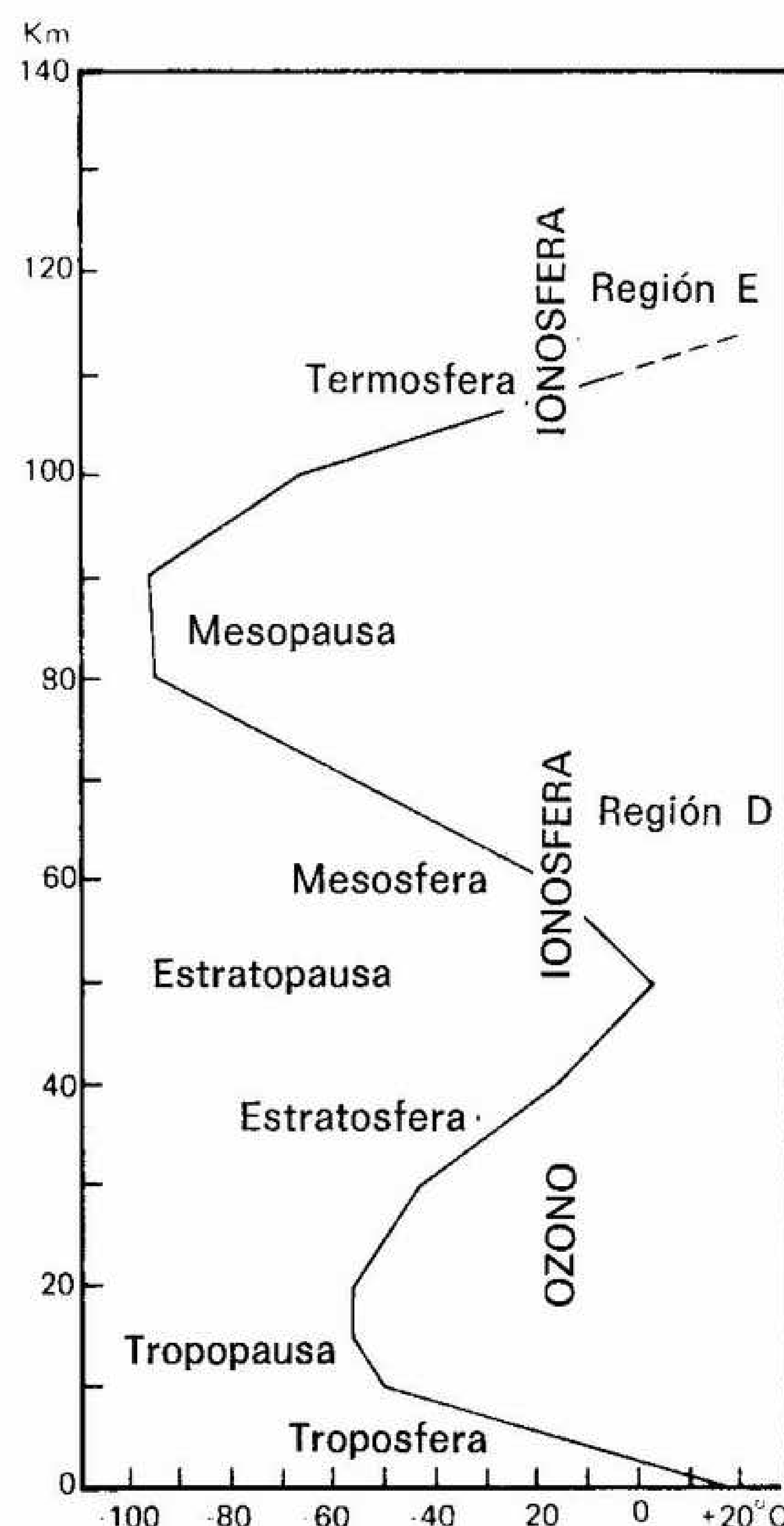


Fig. 13. Variación de la temperatura atmosférica con la altura (basado en la figura 3.2 de *Everyman's Astronomy*, editado por R. H. Stoy (J. M. Dent, Londres, 1974).

regiones superiores; pero la mayor parte de esa energía incidente penetra hasta las capas inferiores y alcanza la superficie sólida de la Tierra. El suelo caliente proporciona calor a los niveles atmosféricos situados inmediatamente por encima del mismo, fundamentalmente mediante la re-irradiación de longitudes de onda infrarrojas; no obstante, también hay una pequeña proporción de ese calor que se propaga por conducción. La atmósfera inferior se calienta debido a que las radiaciones infrarrojas son absorbidas por el vapor de agua y el dióxido de carbono; y esa energía es de nuevo re-irradiada, volviendo parte de la misma al suelo (iniciándose una vez más el ciclo) y difundiéndose la parte restante hacia regiones más elevadas de la atmósfera. El resultado final de este continuo trasvase de energía es que la superficie de la Tierra está ligeramente más caliente de lo que estaría si recibiese exactamente la misma cantidad de radiación solar directa pero suponiendo que la atmósfera no existiese; es, en definitiva, el "efecto de invernadero". Ese calentamiento también produce corrientes de convección en la atmósfera, al menos en sus regiones inferiores, y esto juega un papel primordial en la circulación atmosférica, de la cual dependen en gran medida los cambios climáticos. Pero en gran parte, esta convección está confinada a una capa bien definida próxima a la superficie de la Tierra, la troposfera, limitada en su parte superior por la presencia del ozono de la estratosfera.

Dentro de la troposfera (la capa en que se producen los cambios meteorológicos), la temperatura de la atmósfera disminuye unos 6 °C por cada kilómetro que aumenta la altura. Esta disminución de temperatura se desacelera a unos 10 kilómetros de altitud; desaparece a unos 15 kilómetros; y entre los 20 y los 50 kilómetros la temperatura aumenta desde un mínimo de unos –60 °C hasta un máximo de 0 °C en el techo de la estratosfera (la estratopausa). Esta capa relativamente caliente –la estratosfera– corresponde aproximadamente a la capa de concentración de ozono, y el calentamiento es debido precisamente a la presencia de ese ozono.

El ozono es un gas azulado con un olor característico conocido por todas aquellas personas que han trabajado con electrodos de soldadura; es el olor que emana de la parte de atrás de un TV en color en funcionamiento, o el de las radiaciones ultravioletas utilizadas para esterilizar la banda "germenicida" de longitudes de onda inferiores a los 2.800 Ångströms. Así como el ozono es altamente considerado en relación al tema de la salud por la vitalidad de las frescas brisas marinas –al igual que como coraza protectora atmosférica–,

irónicamente es un gas altamente venenoso, incluso en concentraciones de tan sólo una parte por millón en el aire. El gas es ligeramente oxidante, lo cual no constituye ninguna sorpresa, ya que cada molécula de ozono contiene tres átomos de oxígeno, mientras que las moléculas ordinarias de oxígeno sólo tienen dos átomos. El ozono absorbe las radiaciones situadas en la banda de longitudes de onda de 2.800 Å y más cortas. Por eso fue identificado en la atmósfera gracias a su gran capacidad de absorción de la radiación solar. Esta absorción es lo que calienta la estratosfera, pero los aspectos concretos del proceso no son tan evidentes como puede parecer a primera vista.

En primer lugar, el oxígeno molecular se disocia en los átomos que lo componen cuando absorbe las radiaciones ultravioletas procedentes del Sol. La cantidad de energía absorbida y el número de moléculas disociadas dependen de la intensidad de la radiación (la cual aumenta con la altitud) y del número de moléculas existentes (el cual disminuye con la altitud); por tal razón, el máximo efecto se produce en el nivel en que ambos factores están compensados. Los átomos de oxígeno libres resultantes de la disociación pueden combinarse con moléculas no disociadas formando ozono (O_3); la formación de ozono continuará mientras existan átomos libres y moléculas de oxígeno susceptibles de combinarse; esta limitación restringe la franja altitudinal dentro de la cual puede producirse el proceso que acabamos de describir. Además, esta combinación parece producirse con mayor facilidad cuando hay otros tipos de moléculas alrededor, las cuales catalizan la reacción sin que ellas mismas se vean afectadas. La combinación de todos estos factores produce una mayor concentración de ozono en las altitudes comprendidas entre los 20 y los 30 kilómetros. El mismo ozono puede absorber radiación y, de hecho, lo hace; por tanto, también se disocia dando lugar a un átomo de oxígeno libre y a una molécula diatómica por cada molécula de ozono. Todos estos procesos ocurren al mismo tiempo produciendo un equilibrio que logra que la cantidad de ozono en la estratosfera se mantenga aproximadamente constante a lo largo del tiempo, a pesar de que la formación y disociación de moléculas sea constante. Es como un río que mantiene sus propiedades a pesar de que las moléculas de agua que transporta no son nunca las mismas sino que están cambiando continuamente.

A pesar de existir estas complicaciones, se han realizado cálculos que concuerdan correctamente con las concentraciones de ozono observadas por encima de los 10 km a partir de la medición de la absorción de la radiación solar debida a las mismas. Estudiadas en detalle, las reacciones de que hemos hablado son bastante complejas, y por ello no siempre puede saberse hasta qué punto los cambios en las condiciones atmosféricas afectan a las concentraciones de ozono; esto ha provocado una gran preocupación en torno a las alteraciones del equilibrio atmosférico natural a causa de los procesos contaminantes. Esas alteraciones provocarían la desaparición de la capa de ozono, por lo que las radiaciones nocivas alcanzarían directamente la superficie sólida de la Tierra.

Si se destruye el equilibrio natural, el tiempo necesario para restablecerlo depende en gran medida de la altitud; en altitudes de más de 50 kilómetros, el equilibrio puede volver a lograrse en unos pocos minutos; pero en las regiones situadas a menos de 30 kilómetros de altitud pueden transcurrir varios días antes de que el equilibrio se restablezca. Por ello, la región inferior nunca está realmente en equilibrio, ya que la circulación meteorológica introduce continuamente perturbaciones; debido a que esta región es precisamente la de mayor concentración de ozono, los observadores cuyos aparatos están situados en tierra firme han observado una estrecha relación entre los cambios en la circulación atmosférica y los cambios en la absorción del ozono. Las concentraciones de ozono también están afectadas por los cambios latitudinales en la intensidad de la radiación solar y por la alternancia de las estaciones; teniendo en cuenta este hecho y considerando que el ozono está producido gracias a la acción de la luz solar, no es fácil entender por qué no disminuye la concentración de ozono durante la noche.

Pero, además, la concentración absoluta de ozono tiende a aumentar ligeramente durante la noche, y esta sorprendente constatación revela los peligros de deducir conclusiones "evidentes" acerca del comportamiento de la capa. La causa de este efecto tan particular es que a altitudes de más de 40 kilómetros la fuerte radiación solar ultravioleta disocia eficazmente el ozono; por lo que, cuando no hay radiación luminosa, el balance químico se desplaza hacia unas mayores concentraciones de ozono. A altitudes inferiores, la concentración de ozono debería tender a disminuir cuando no hay luz solar, pero en este caso el tiempo necesario para alcanzar un nuevo equilibrio es superior a la duración de una noche, por lo que el efecto es prácticamente inapreciable. El efecto resultante, considerando toda la columna atmosférica, es que en las zonas de mayor concentración de ozono ésta permanece prácticamente invariable durante la noche, mientras que en las tenues capas superiores la concentración de ozono aumenta ligeramente. No hay ninguna duda acerca de la importancia de la capa de elevada concentración de ozono sobre el hombre; las formas de vida sólo aparecieron, primero en los océanos y después en tierra firme, cuando la cantidad de oxígeno liberada fue suficiente como para permitir la formación de la capa de ozono que protege a la Tierra de las radiaciones ultravioletas intensas; y probablemente este hecho no es una simple coincidencia. Aunque no se conocen con seguridad los efectos contaminantes producidos por los aviones supersónicos que vuelan a gran altura o por los gases de los aerosoles sobre el equilibrio del ozono, está claro que se debe evitar cualquier alteración de este valioso escudo protector.

Encima de la estratosfera, entre 50 y 80 kilómetros de altitud, hay otra capa caracterizada por sus bajas temperaturas; es la mesosfera, en cuya parte superior (entre 80 y 90 kilómetros) se alcanzan las temperaturas atmosféricas más bajas (unos −100 °C). A partir de ese límite, la temperatura aumenta regularmente debido principalmente a la absorción de energía por las moléculas de oxígeno a medida que van disociándose; pero a esa distancia la escasez de moléculas libres y la intensidad de la radiación provocan la no formación de ozono. Por el contrario, la absorción va incluso más lejos, produciéndose la ionización de los átomos, que, entonces, sueltan uno o más electrones y provocan la formación de una atmósfera de partículas cargadas (iones positivos y electrones negativos). En cierto modo, el techo de la capa de incremento de temperaturas (la termosfera) está a la temperatura del espacio interplanetario, pero a unas densidades tan bajas como las existentes en esas regiones, el concepto de "temperatura" pierde su significado. Una mejor referencia para ubicar los límites de la atmósfera la proporciona el hecho de que a unos 500 kilómetros de altitud la densidad de la misma es tan baja que las moléculas que la componen, átomos e iones, son tan escasas que prácticamente no puede considerársela como un gas continuo; por encima de este límite, en la región conocida como exosfera, las partículas pueden escapar libremente hacia el espacio. Sin embargo, la referencia correcta se obtiene considerando a las regiones ionizadas de la atmósfera en términos de su interacción con el campo magnético terrestre, ya que en esas regiones la principal fuerza que mantiene a las partículas en sus posiciones es el magnetismo y no la gravedad.

La ionosfera es la región de la atmósfera terrestre que se extiende entre la estratosfera y la exosfera. La presencia de partículas ionizadas en esta región fue localizada cuando se descubrió que las ondas de radio podían transmitirse dando la vuelta a la Tierra; las ondas de radio viajan en línea recta y su transmisión a través de grandes distancias es posible gracias a que las capas ionizadas reflejan las longitudes de onda mayores de quince metros. Las ondas más cortas penetran sin ser reflejadas, y por eso las transmisiones de V.H.F. y de TV sólo pueden captarse si el receptor está situado dentro del área de cobertura del transmisor. Según esta definición, la mesosfera y la termosfera son subdivisiones de la ionosfera; pero, normalmente, la ionosfera suele dividirse en tres capas, D, E y F, definidas según el grado de ionización que contengan.

La región D, situada entre 50 y 90 kilómetros, está débil-

mente ionizada y desempeña un pequeño papel en la reflexión de las ondas de radio. La región E, entre 90 y 160 kilómetros, contiene moléculas más ionizadas y, por último, la región F, la más externa, contiene átomos muy ionizados. En términos radiofónicos, la región E se diferencia de la F porque durante la noche su débil ionización prácticamente desaparece por completo, lo que permite captar estaciones de A.M. muy alejadas. Estas dos capas también son conocidas como Heaviside-Kennelly (E) y Appleton (F), según los nombres de sus descubridores respectivos; a veces, la capa F se subdivide en dos subcapas llamadas F1 y F2. Sin embargo, para los científicos, más que los nombres de esas subdivisiones, es muy importante el hecho de que tanto la capa E como la F están fuertemente afectadas por los cambios de la actividad solar, entre los que se cuentan las erupciones solares, el período de rotación solar de 27 días y los ciclos de manchas solares de 11 años de duración aproximadamente. La influencia de la actividad solar en las capas internas de la atmósfera terrestre desempeña un importante papel en los cambios climáticos, los cuales, a su vez, están relacionados con los cambios solares.

Más allá de la ionosfera, la magnetosfera constituye la región más externa de la atmósfera terrestre y se extiende por encima de los 500 kilómetros de altitud; en esa región la ionización es tan completa que las partículas forman un plasma que se encuentra confinado en el campo magnético terrestre. La magnetosfera es el límite absoluto de la Tierra. En la parte opuesta, el viento solar de partículas cargadas que sopla incesantemente contra nuestro planeta interactúa con el campo magnético terrestre formando una onda de choque cuya distancia equivale a unas catorce veces el radio terrestre. Existen también dos zonas de alta densidad de partículas centradas sobre el ecuador a 3.000 y 15.000 kilómetros de altura respectivamente; son los "Cinturones de Van Allen", descubiertos en los años 50 gracias a los experimentos efectuados a bordo de los primeros satélites artificiales. En los años 70, el conocimiento de la magnetosfera progresó enormemente gra-

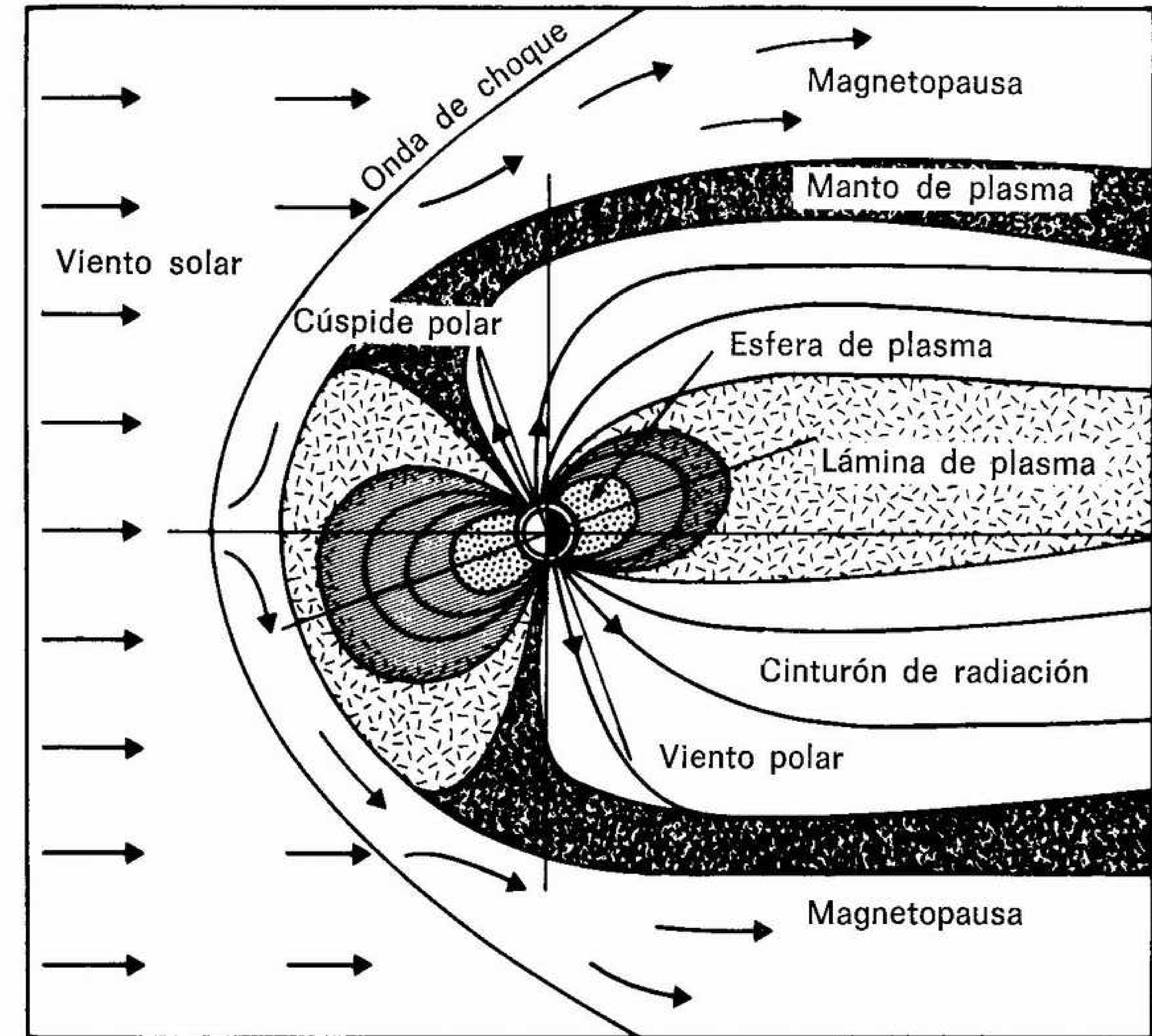


Fig. 14. Sección transversal de la magnetosfera en la que se observa el manto de plasma descubierto por el satélite europeo HEOS-2.

cias a las observaciones efectuadas mediante el satélite europeo HEOS-2, lanzado en 1972; este satélite exploró la magnetosfera por encima del Polo Norte y descubrió la cúspide polar (véase la figura 14); también descubrió y cartografió la envoltura magnética, una larga cola o manto de plasma que se alarga "corriente abajo" del viento solar. En su acción protectora contra las partículas cargadas del viento solar, el campo magnético las desvía hacia los cinturones de Van Allen, pero algunas de esas partículas alcanzan las regiones polares de la atmósfera superior, cerca de las cúspides, en donde la interacción de los electrones desplazándose a gran velocidad con los

átomos atmosféricos da lugar a las coloreadas auroras. Cerca de los polos, la actividad asociada con estos fenómenos altera la ionosfera y afecta a las transmisiones radiofónicas. La circulación atmosférica también se ve afectada por las ráfagas de partículas solares, tal como lo prueba el hecho de que, pocos días después de una brillante aurora, se intensifican las perturbaciones ciclónicas (depresiones) en las altas latitudes.

El descubrimiento de estas interacciones entre el cambiante nivel de la actividad solar y el clima pone de manifiesto las diferencias fundamentales entre nuestro planeta y una nave espacial artificial. El motor de la astronave terrestre no está dentro de su casco, sino fuera; es el Sol, al cual estamos conectados por un vínculo gravitacional. Sin el calor del Sol nuestra astronave sería inhabitable y puesto que, al parecer, la Tierra responde a las más pequeñas fluctuaciones solares, los planes más complejos siempre estarán a merced de las más insignificantes variaciones en la actividad solar.

La relación entre la actividad solar y el clima está expuesta detalladamente en el libro *Forecasts, Famines and Freezes**, por lo que este capítulo estará dedicado a las conexiones entre los procesos solares y la actividad sísmica, cuya influencia sobre los cambios en la faz de la Tierra sólida (tema principal de este libro) está demostrada. Estas conexiones han sido descubiertas –casi contradiciendo las opiniones previas de algunos de los descubridores– a partir de diversas constataciones que muestran que los cambios en la actividad sísmica están a veces asociados con cambios en la rotación de la Tierra (cambios en la duración del día), y también que los cambios en la duración del día están en ocasiones asociados con cambios en la actividad solar. De la combinación de ambos tipos de efectos, surge la teoría de una relación entre la actividad solar y la actividad sísmica. No obstante, a comienzos de los años 70, la idea de que las manchas solares podían provocar terremotos fue considerada por el *establishment* científico como una especie de herejía y consideraban que las

* Wildwood House, Londres, 1976 y Walker, Nueva York, 1976.

pruebas de dicha relación no eran más que una coincidencia. Aún hoy en día hay una escuela de pensamiento que no cree en este tipo de relaciones, aunque no parece que existan muchas razones para dudar de las mismas, tal como se verá a continuación. Puede que sea un disparate decir que todos los cambios en la actividad solar provocan terremotos importantes, pero las observaciones demuestran que hay una ligera tendencia hacia el incremento de la actividad sísmica durante ciertas fases del ciclo de las manchas solares; además, también se ha observado que las protuberancias solares más importantes pueden ser correlacionadas con los microseísmos que se producen en la Tierra. Esta afirmación no afecta ni ataca directamente a los sismólogos, especialmente desde el momento en que las relaciones entre los cambios de la actividad solar y la circulación atmosférica terrestre permiten explicar la conexión física entre la actividad solar y los procesos geofísicos.

Desde comienzos de los años 60, con el advenimiento de los relojes atómicos que proporcionan la precisión necesaria para este tipo de estudios, muchos grupos de astrónomos han investigado las variaciones en la longitud del día (L.O.D.) causadas por la cambiante tasa de rotación de la Tierra. No es sorprendente que, en promedio, la Tierra se esté desacelerando (con el subsiguiente aumento de la L.O.D.); este efecto se conoce desde hace mucho tiempo y puede ser explicado sencillamente como el resultado de la acción de las mareas y, especialmente, de las mareas que afectan a la Tierra, la Luna y el Sol. Pero, recientemente, han sido descubiertos otros cambios más sutiles de la L.O.D. que se superponen a los cambios anteriores tendentes esencialmente a la desaceleración. De todo ello surgen diversos rompecabezas. Uno de ellos es el "Chandler Wobble" ("Bamboleo de Chandler"), según el cual los polos dan vueltas en relación con las estrellas, afectando a la L.O.D. con una periodicidad regular de catorce meses. La causa exacta de este bamboleo es desconocida, aunque puede que esté asociada con desplazamientos fluidos en el núcleo de la Tierra; su evolución puede ser predicha, ya que desde que

fue descubierto se ha comportado de forma regular, por lo que no hay razones para suponer que va a dejar de comportarse así de un momento a otro. La actividad sísmica también muestra una fluctuación periódica si se toma el mismo plazo de tiempo y, además, las energías involucradas en los diferentes niveles de actividad sísmica son del mismo orden de magnitud que las involucradas en el "Chandler Wobble". Por eso, lógicamente, algunos geofísicos sostienen que la actividad sísmica provoca ese movimiento, mientras que otros, por el contrario, opinan que es el bamboleo el desencadenante de los terremotos. Parece razonable suponer que, como consecuencia del movimiento general de la Tierra, se desencadenan terremotos en los lugares en los que se hayan acumulado importantes procesos de cambio, y esta idea es el eje central de las investigaciones acerca de cómo pueden las manchas solares provocar, al menos, micro-terremotos.

La L.O.D. varía más rápidamente cuando se producen los cambios de estaciones; la causa de esto parece bastante clara: radicaría en los movimientos atmosféricos a gran escala y en los cambios estacionales de los circuitos eólicos. A primera vista esto puede parecer sorprendente, ya que la atmósfera, tal como se ha explicado, no es sino una envoltura superficial muy ligera. Pero debido precisamente al hecho de hallarse tan al exterior, incluso su relativamente pequeña masa puede afectar de forma significativa a la L.O.D., ya que su momento angular es proporcionalmente mayor que el de la misma cantidad de masa situada en el núcleo. El efecto es parecido al que utilizan los patinadores sobre hielo para alterar su rotación moviendo los brazos. Pero, en realidad, se produce una variación de tan sólo una veintena de milisegundos por año. En conclusión, la atmósfera puede afectar a la L.O.D., y ésta es la otra conexión en la cadena que va desde las manchas solares hasta los terremotos.

Actualmente, la conexión definitiva entre las manchas solares y el clima está firmemente establecida gracias a diferentes tipos de estudios que van desde el análisis de los efectos específicos de determinadas protuberancias solares hasta las

investigaciones de los factores climáticos y la producción agrícola a lo largo de los diversos ciclos de actividad solar. Por tal motivo, el descubrimiento de una ligera tendencia hacia el incremento de la actividad sísmica durante los máximos y los mínimos de manchas solares (es decir, los momentos en que el nivel de actividad solar cambia más rápidamente) es de fácil estudio, a pesar de que no tenga una gran utilidad para predecir terremotos concretos. Los estudios de una gran protuberancia solar ocurrida en 1972 (la mayor conocida y lo bastante grande como para afectar por sí sola, y de forma medible, a la L.O.D. y a la actividad microsísmica) fueron el punto final en las investigaciones acerca de este tipo de relaciones entre la Tierra y el Sol.

Las definiciones clásicas del estándar del tiempo, el Tiempo Universal o T.U., dependen de la medición de la rotación de la Tierra respecto a unas estrellas consideradas fijas; algunos observatorios registran el T.U. en continuo (p. ej., el "Royal Greenwich Observatory", en Herstmonceux, Gran Bretaña, y el "U.S. Naval Observatory" en Washington). Los dos observatorios datan de los tiempos en que las armadas de todo el mundo impulsaban las investigaciones para conseguir medir el tiempo con mayor precisión con el fin de mejorar la navegación. Actualmente, la medición del T.U. posee un interés crucial para los astrónomos, quienes necesitan conocer las desviaciones del T.U. respecto al nuevo estándar del Tiempo Atómico (T.A.) para así determinar el momento preciso en que deben dirigir sus telescopios en ciertas direcciones para localizar cuerpos celestes particulares. Por eso, cualquier científico que contacte con uno de esos reputados observatorios podrá obtener rápida y fácilmente un registro continuo del T.U., calibrado respecto al T.A. Cuando se produjo la mayor tormenta solar conocida, en agosto de 1972, el autor de este libro ya estaba interesado en la posible existencia de una relación entre la actividad solar y los terremotos y estaba investigando acerca de la misma con su colega de la NASA, el Dr. Stephen Plagemann. Al final del año, se obtuvo un registro continuo de la cambiante diferencia entre el T.U. y el T.A. a

lo largo del período comprendido entre mayo y octubre de 1972; dicho registro lo proporcionó el "U.S. Naval Observatory". En él se veía una desviación más o menos constante a lo largo del año con una sola salvedad: un brusco salto justo después de la gran tormenta solar.

La tormenta empezó el día 2 de agosto y se prolongó durante unos cuantos días; entre el 7 y el 8 de agosto se produjo un abrupto cambio en la tasa de rotación de la Tierra, el cual afectó a la L.O.D. en más de 10 milisegundos; eso supone el mayor cambio nunca registrado ocurrido en un solo día. Durante las siguientes semanas, la rotación de la Tierra se desaceleró bastante más despacio de lo que lo hacía antes del cambio; posteriormente, volvió a la misma tasa de disminución regular de la L.O.D. que tenía antes de la tormenta solar (fig. 15). El corto intervalo de tiempo transcurrido entre el

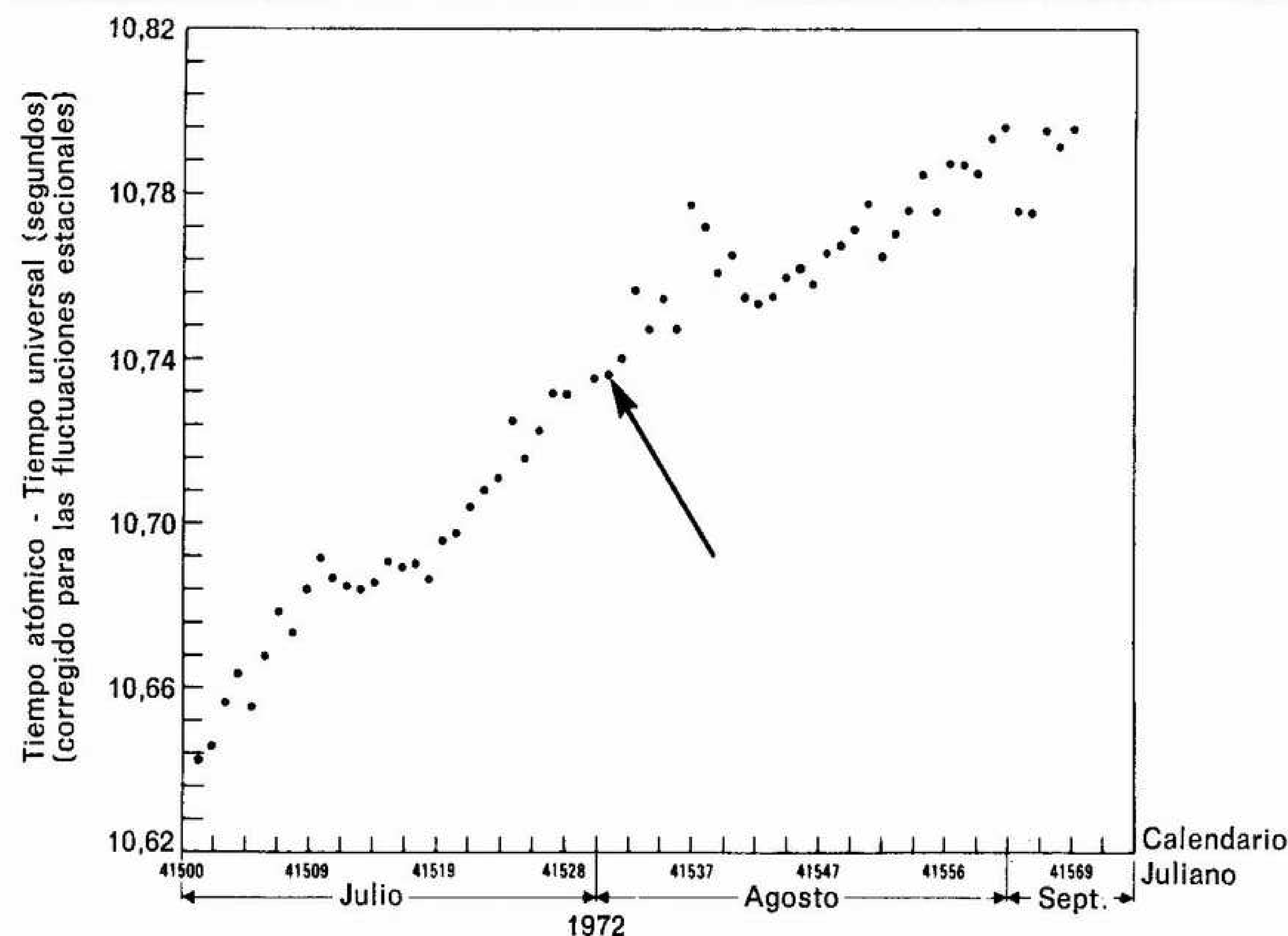


Fig. 15. Variación entre el T.A. y el T.U. durante una parte de 1972. La flecha señala el momento en que empezó la gran tormenta solar.

máximo de actividad solar y la alteración de la rotación de la Tierra encaja correctamente con la idea de que las partículas y el plasma procedentes del Sol modifican la circulación atmosférica lo bastante como para producir los efectos observados sobre la rotación y la L.O.D. Cuando se publicaron estas opiniones, los estudiosos de los cambios en la longitud del día criticaron el estudio, ya que no estaban de acuerdo en la utilización de los datos de un solo observatorio; también criticaron la "no atenuación" de las observaciones utilizadas. Incluso hoy en día, muchos astrónomos no consideran que esa teoría sea una prueba concluyente. Pero precisamente ese tipo de efecto suele quedar oscurecido si se aplican las técnicas de atenuación clásicas y, a pesar de que las críticas acerca de la utilización de los datos de un solo observatorio sean válidas, sería una coincidencia realmente extraordinaria haber comprobado exactamente los mismos efectos que se habían predicho en un observatorio que estuviese, por casualidad, en el lugar oportuno. Sin embargo, todas estas discusiones parecen haberse apaciguado por obra y gracia de las investigaciones de unos terremotos, publicadas en 1975, a cargo del Dr. Surendra Singh, de la Universidad de Ciencias de Malaysia.

Estas investigaciones estaban concentradas en las variaciones temporales de los micro-terremotos de las cercanías de Socorro, en Nuevo México, y cubrieron el período de la gran tormenta solar de agosto de 1972. El Dr. Singh encontró un brusco incremento en el número de microseísmos inmediatamente después de la tormenta, con un desfase de unos quince días, por lo que la cumbre de la actividad sísmica se produjo el 20 de agosto; es decir, que coincidió con el período durante el cual la tasa de desaceleración de la Tierra pareció haber sido alterada. En esta región, los microseísmos con energías de hasta 10^{12} ergios y profundidades focales de unos cinco kilómetros se producen un par de veces por día; el 19 de agosto de 1972 se produjeron catorce sacudidas de este tipo, y el día 20 de agosto, dieciséis. En la línea de las prácticas científicas habituales, sería muy interesante poder contrastar los resultados obtenidos en 1972 con otros estudios similares; pero este

aspecto parece de difícil solución, ya que el suceso de agosto de 1972 es el mayor conocido, y tan sólo se ha producido otro similar en 1959. Algunos científicos aún creen en las coincidencias, pero el esquema global, construido a partir de diferentes especialidades próximas entre sí, es bastante convincente: la actividad solar afecta al clima, a la rotación de la Tierra e incluso, aunque en menor medida, a los terremotos. La predicción de los grandes incrementos de actividad solar tal vez podría ser utilizada, a su vez, para predecir los terremotos; esta posibilidad ha sido investigada en el libro titulado *The Jupiter Effect**. Sin embargo, sería interesante estudiar los procesos que se producen más allá de nuestra magnetosfera para ver de qué manera los cambios en la estructura magnética del sector interplanetario solar pueden afectar a la naturaleza de la conexión entre la Tierra y el Sol.

La mejor referencia la proporciona el estudio de la influencia solar sobre la meteorología; el pionero de este tipo de estudios en su versión moderna ha sido el Dr. Walter Orr Roberts, de la Universidad de Colorado y del "National Center for Atmospheric Research" en Boulder, Colorado, junto con algunos colegas. Para dar a este tipo de investigaciones una base estadística firme, en lugar de utilizar las siempre subjetivas clasificaciones de buen y mal tiempo, se utiliza un parámetro llamado "índice del área de vorticidad"; en esencia, cuando este índice (V.A.I.) es alto hay mayor cantidad y/o más profundos surcos de bajas presiones. Las variaciones de este índice están afectadas no sólo por los fenómenos en la magnetosfera y la ionosfera que quizás podrían tener un origen terrestre, sino incluso por los cambios en el viento solar y, especialmente, por los denominados sectores magnéticos solares.

Las observaciones efectuadas mediante las sondas espaciales desde mediados de los años 60 han demostrado que la influencia del campo magnético solar se extiende a través del

* John Gribbin y Stephen Plagemann. *The Jupiter Effect* (Macmillan, Londres, 1974 y Walker, Nueva York, 1974).

espacio formando una estructura bien definida. Si el Sol no girase, podríamos imaginar las líneas del campo magnético solar distribuyéndose radialmente y siendo impelidas por el viento solar hasta alcanzar la órbita terrestre; si se tiene en cuenta el efecto añadido por la rotación solar, los límites de los diferentes sectores delimitados por las líneas magnéticas se torcerían como el muelle de un reloj. Esto es una simplificación de la realidad, pero da una idea de lo que se intenta explicar cuando se habla de la estructura de los sectores magnéticos solares. Las sondas espaciales han revelado que la dirección del campo magnético posee signos opuestos en sectores adyacentes (hacia el Sol o alejándose del mismo), con unas zonas límites muy delgadas. Puesto que la dirección del campo magnético juega un papel muy destacado en el control del flujo de partículas cargadas, el paso de un límite entre sectores a través de la magnetosfera terrestre es claramente un hecho de gran importancia en relación con las conexiones entre la Tierra y el Sol. Durante la mayor parte del tiempo pueden verse cuatro sectores, cada uno de los cuales cubre, si se miran desde el Sol, un ángulo de unos 90°; los sectores giran, al igual que el Sol, cada veintisiete días, provocando el paso de un límite entre sectores a través de la Tierra cada siete días aproximadamente. Uno o dos días más tarde del paso de un límite entre sectores, se produce un incremento de la actividad geomagnética, mediante el cual también el V.A.I. se ve afectado.

La medición del V.A.I. en el hemisferio Norte, a un nivel de presión atmosférica de 500 milibares (el cual es una especie de indicador de la actividad ciclónica), muestra claramente, en términos estadísticos, la influencia del paso de un límite entre sectores sobre la actividad ciclónica media; naturalmente, esta visión estadística no es aplicable necesariamente a cada caso particular. El índice alcanza valores mínimos en el día que sigue al paso de un límite; a continuación aumenta aproximadamente un 10 % durante los próximos dos o tres días. Incluso los meteorólogos de la Universidad de Toronto más escépticos en un principio, tuvieron que aceptar, cuando

trataban de demostrar la inexistencia de tales conexiones, que las estadísticas no pueden ser refutadas y han pasado de ser una oposición a la teoría de Roberts a ayudarle en las investigaciones acerca de los mecanismos actuantes. Mientras tanto, el propio Roberts ha estudiado de manera profunda los lazos entre los cambios del V.A.I. y la actividad solar.

Este esquema es algo más complejo, pero parece bastante real. Al primer o segundo día después de una protuberancia o una erupción solar, el índice del área de vorticidad se incrementa entre un 5 y un 10 % en relación con el nivel de base; al segundo o tercer día empieza la tormenta geomagnética asociada; al tercer o cuarto día, el V.A.I. disminuye entre un 5 y un 10 % por debajo del nivel de base (y quizás hasta un 20 % por debajo del pico alcanzado justo después de la erupción); y al quinto o sexto día las cosas vuelven a la normalidad. Una vez más, esta visión estadística general está sujeta a variaciones para cada caso particular y, por supuesto, en algunas ocasiones, se superponen los efectos de la estructura de sectores y de las erupciones solares. Y a pesar de que aún hay mucho trabajo por hacer antes de que pueda formularse una teoría física que explique todos los detalles, no hay duda alguna acerca de la realidad de esos efectos. Esto debe satisfacer al Dr. Roberts, quien ha defendido durante más de veinte años la existencia de una conexión entre la actividad solar y la meteorología; su lucha empezó desde el momento en que supo que la Tierra tenía una magnetosfera o que el Sol tenía una estructura de sectores magnéticos que se intersectaban con nuestro planeta.

Hay dos maneras posibles para llevar adelante este tipo de trabajo. En la Tierra, se necesitan urgentemente estudios acerca del hemisferio Sur con el fin de que el número cada vez mayor de científicos que investigan estos cambios pueda elaborar un esquema global más perfeccionado. Y en relación con el exterior de la astronave terrestre existe una necesidad igualmente urgente por determinar qué tipo de erupciones solares son las que producen cambios más importantes en la vorticidad de la atmósfera terrestre en las latitudes altas.

Si se quiere estudiar nuestro planeta como un todo es prácticamente imposible trazar una línea divisoria entre las ciencias de la Tierra y la Astronomía. Las conexiones con el Sol son tan estrechas que no permiten olvidar que la Tierra no es, después de todo, más que un planeta, uno de entre los nueve que orbitan alrededor del Sol. ¿Y quién sabe cuántos planetas hay en el espacio dando vueltas alrededor de cuántos soles? Pero hoy en día, gracias a los datos proporcionados por las sondas espaciales, se puede contemplar la situación desde una nueva perspectiva. Las nuevas concepciones acerca de la Tierra ayudan a los científicos planetarios a interpretar los datos procedentes de otros planetas, así como a hacerse una idea de sus semejanzas y sus diferencias. Recíprocamente, los nuevos conocimientos acerca de los planetas del Sistema Solar son de gran utilidad para comprender el funcionamiento y la estructura de nuestro propio planeta, y ello aun a pesar de su escasa relevancia dentro de la escala cósmica de las cosas.

X. GEOFÍSICA DE OTROS PLANETAS

Las observaciones efectuadas años atrás mediante las naves espaciales han puesto de manifiesto que todos los relativamente pequeños planetas interiores, o "terrestres", de nuestro Sistema Solar son, en líneas generales, muy parecidos los unos a los otros; y ello a pesar de que, superficialmente, puedan parecer muy distintos a la Tierra debido a la importancia que en ella poseen el viento y las olas. Estos cuatro planetas —Mercurio, Venus, la Tierra y Marte— (o cinco si se considera a la Luna como un planeta) son objetos sólidos, rocosos. Sus diferencias estriban en sus tamaños y en las distancias de sus órbitas respecto al Sol. Éstos son los planetas que se consideran englobados dentro de la extensión del término "geofísica" más allá de los confines de la Tierra. Los planetas gaseosos gigantes, situados más allá de Marte, son bastante diferentes y el, hasta hace poco, tenue y misterioso Plutón, en los límites del Sistema Solar, presenta una configuración que da pie a todo tipo de especulaciones relativas tanto a su origen como a la composición de su atmósfera o a la relación con su único satélite, Caronte. Pero incluso la restricción de la geofísica al estudio de los planetas terrestres puede que suponga un punto de vista demasiado limitado; en este sentido, si se tiene en cuenta la presencia de un gran campo magnético, el planeta que más se parece a la Tierra es el mayor que existe en el Sistema Solar: Júpiter. Por eso, aunque los planetas interiores son los que más han llamado la atención, y so-

bre los que se centrará este capítulo, también nos ocuparemos de Júpiter como ejemplo de que la exploración del Sistema Solar exterior está sólo empezando y de que si sólo se toman en cuenta los planetas situados en el interior de la órbita de Marte, la visión que se obtiene del Universo es forzosamente muy limitada. Sin embargo, tiene sentido que empecemos con los planetas interiores y, de entre ellos, con el más interior de todos: Mercurio.

Las fotografías realizadas por el Mariner 10 al sobrevolar Venus y Mercurio plantearon serios interrogantes a los científicos dedicados al estudio de los planetas, ya que aunque la superficie de Mercurio es parecida a la de la Luna, su interior debe de parecerse más al de la Tierra. La superficie de Mercurio, con un gran número de cráteres, se parece tanto a la de la Luna que ni tan sólo un experto podría afirmar con seguridad que las fotografías del Mariner 10 no proceden de la Luna. Al igual que la Luna, también parece que Mercurio posee dos tipos de regiones topográficas características: regiones "altas" con una gran densidad de cráteres, y llanuras con pocos cráteres parecidas a los mares lunares. También se han descubierto cráteres en Marte y en Venus gracias a las observaciones de radar a través de las nubes, y en la Tierra, pero en nuestro planeta el relieve de los cráteres ha sido alterado por la erosión. Para un astrónomo, este hecho demuestra que todos los planetas interiores estuvieron sometidos a un intenso bombardeo de fragmentos rocosos durante las etapas iniciales de formación del Sistema Solar. Pero para los geofísicos hay un descubrimiento aún más interesante: la presencia en Mercurio de muchos acantilados (escarpes de falla denominados escarpes lobulados) que, al parecer, son el tipo de estructuras de compresión que se formarían si el planeta se hubiera contraído ligeramente. Esto concuerda con el enfriamiento regular de un gran núcleo de hierro, hecho que estaría a su vez totalmente en consonancia con las observaciones efectuadas acerca del campo magnético del planeta.

Debido a la órbita que le fue conferida, el Mariner 10 se acercaba al planeta cada dos años mercurianos. Esto proporcionó a los científicos tres oportunidades de obtención de datos antes de que la reserva de combustible del ingenio espacial se agotase; la comparación entre unos datos y otros ha sido muy valiosa para conocer la estructura del campo magnético del planeta.

La primera sorpresa fue descubrir que Mercurio posee un campo magnético débil que interactúa con el viento solar de forma parecida a como sucede con el campo magnético terrestre, pero todo ello a una escala mucho más reducida. Ese campo equivale aproximadamente al 1 % del campo terrestre, pero incluso siendo tan pequeño es mayor del que poseen Venus o Marte; este descubrimiento interesó lo bastante a los científicos de la NASA como para que decidiesen agotar las últimas reservas de combustible haciendo pasar el Mariner 10 a 327 kilómetros por encima de la superficie del planeta y lo más cerca posible de su polo norte. Esta órbita confirmó los datos relativos a la intensidad del campo y su naturaleza dipolar, hechos que parecían confirmar que el campo estaba siendo generado en el interior del planeta mediante un proceso de dinamo parecido al que produce el campo terrestre. Pero el planeta gira tan lentamente sobre su propio eje (tres veces cada dos años mercurianos) que los científicos quedaron sorprendidos de la efectividad del proceso de dinamo, incluso admitiendo que el planeta posee un gran núcleo de hierro. Evidentemente, el conocimiento de otros planetas puede sernos muy útil para comprender los procesos fundamentales que operan en la Tierra.

El núcleo de hierro de Mercurio es proporcionalmente muy grande. A pesar de que Mercurio tiene un radio de tan sólo 2.440 kilómetros (el radio de la Tierra es de 6.370 kilómetros), su núcleo de hierro representa el 80 % de la densidad total del planeta; este hecho hace que el núcleo, cuyo radio es de 1.800 kilómetros, sea mayor que el núcleo interno de la Tierra y más de un 50 % mayor que el conjunto de todo el núcleo terrestre. Sin duda esto es así porque, debido a la proximidad de Mercurio respecto al Sol, los materiales más ligeros que forman los otros planetas han sido eliminados por

la acción del calor y el viento solares; y esto ha ocurrido en una proporción mucho mayor que en el caso de la Tierra. Es como si Mercurio sólo hubiese retenido el material pesado de un protoplaneta que hubiera tenido un tamaño de por lo menos la mitad más que el de la Tierra si la condensación se hubiese producido a la distancia a que nosotros estamos del Sol.

Mientras que en el caso de Mercurio, y en términos geofísicos, el interés se centra en su magnetismo y en su interior, en el caso de Venus y Marte son sus regiones exteriores y sus atmósferas lo que ha suscitado mayores atenciones. Venus, el planeta que viene a continuación de Mercurio, sigue siendo el más difícil de describir de entre los planetas interiores; y eso es debido a que la capa de nubes que cubre el planeta siempre ha dificultado las observaciones. Algunas sondas espaciales instaladas en su superficie han revelado que su atmósfera es muy caliente y muy densa; los estudios de radar han mostrado que la superficie está llena de cráteres; y, mientras se dirigía a Mercurio, el Mariner 10 envió fotografías de las nubes de Venus y confirmó la ausencia de un campo magnético significativo. Esto es más o menos todo lo que se sabe de Venus y es comparativamente escaso si se tiene en cuenta que Venus posee aproximadamente el mismo tamaño que la Tierra; por tal motivo, los estudios detallados de las diferencias entre ambos planetas son potencialmente muy prometedores para determinar cómo se han formado y cómo han evolucionado.

Una información clave pero que aún no ha sido integrada por completo en el contexto de nuestros conocimientos acerca de los planetas, la proporcionaron unas fotografías de la superficie de Venus enviadas por las dos sondas espaciales soviéticas que se posaron en el planeta a finales de 1975. En ambos casos, las sondas revelaron la existencia de un terreno accidentado pero diferente de un lugar a otro, lo que pone de manifiesto los cambios que están ocurriendo actualmente en la superficie de Venus. En una de las zonas de aterrizaje se observan caos de rocas con bordes abruptos —prueba evi-

dente de que en Venus existe algún tipo de actividad geológica, ya que estos fragmentos de rocas son "jóvenes", es decir, que han debido desprenderse de bloques mayores hace relativamente poco tiempo. En la otra zona de aterrizaje, se observa un caos de rocas parecido, pero en él los fragmentos ya están mucho más redondeados, probablemente debido a la erosión.

Recientemente, el halo que rodea a Venus se ha disipado ligeramente, permitiendo vislumbrar los indicios de una actividad geológica (y quizás incluso geofísica), gracias a las imágenes proporcionadas por la sonda Magallanes. Dicha sonda, lanzada por la NASA el 4 de mayo de 1989, alcanzó el planeta el 15 de septiembre de 1990 con la misión de cartografiar Venus y estudiar la estructura interna del planeta. Dotada con un equipo especial de radioondas centimétricas, que le permite atravesar sin problemas la espesa capa de nubes que rodea el planeta, y obtener imágenes con resoluciones de hasta 120 metros, Magallanes ha proporcionado un valiosísimo material de estudio y ha permitido descubrir la existencia de calderas volcánicas, corrientes de lava, cadenas montañosas, pliegues y fallas, indicios de una gran actividad geológica. Además, muchos de los cráteres de impacto de la superficie planetaria han sido rellenados con posterioridad con lava, lo que permite concluir que la corteza del planeta es delgada. Estas informaciones recogidas por Magallanes se completan con los registros realizados, a lo largo de catorce años, por la misión Pioneer-Venus (lanzada en 1978 y que funcionó desde el 9 de diciembre de dicho año hasta octubre de 1992). Pioneer-Venus ha permitido obtener gran cantidad de información relativa a la composición y la dinámica de la atmósfera del planeta y de las regiones próximas a él. Gracias a estas sondas se ha podido constatar que, diferencias aparentemente insignificantes en cuanto a las condiciones en que han evolucionado Venus y la Tierra, han dado lugar a caminos evolutivos muy diferentes.

Admitiendo que la estructura del interior de Venus sea semejante a la de la Tierra —y debería serlo porque ambos pla-

netas se formaron en la misma región del Sistema Solar a partir de la misma nube de material protoplanetario—, la ausencia de un campo magnético puede explicarse teniendo en cuenta que el planeta gira una sola vez cada 243 días terrestres; es decir, demasiado lentamente como para que el efecto de dinamo sea operativo tal como lo es en la Tierra. Además, la rotación del planeta es mucho más lenta que la de las nubes de la atmósfera exterior de Venus; la atmósfera da la vuelta al planeta cada seis días terrestres, generando vientos muy fuertes. La atmósfera es la parte que mejor conocemos de Venus, pero, por el momento, este planeta plantea más interrogantes que respuestas y, por ahora, ni tan sólo se sabe cómo se forman esos rápidos vientos cuyas velocidades a veces superan los 100 metros por segundo o por qué la baja atmósfera del planeta presenta fenómenos de superrotación.

La atmósfera de Venus es, en relación a este planeta, un elemento mucho más destacado que la atmósfera de la Tierra; aunque la masa del planeta es aproximadamente la misma que la de la Tierra, la masa de su atmósfera es 100 veces mayor que la de nuestra atmósfera y ello a pesar de la dificultad teórica de aceptar que un planeta más próximo al Sol tenga una atmósfera mayor que la de la Tierra. Esta atmósfera masiva está constituida fundamentalmente por dióxido de carbono, y produce un fuerte efecto de invernadero que eleva la temperatura de la superficie del planeta hasta más de 450 °C. La causa de esto es probablemente la proximidad de Venus respecto al Sol; por esa razón, e incluso antes de que el efecto de invernadero fuese realmente importante, la superficie del planeta estaría demasiado caliente como para permitir la formación de océanos de agua. En la Tierra hay tanto dióxido de carbono como en Venus, pero aquí en su mayor parte está retenido en forma de compuestos en las rocas superficiales. Todo el dióxido de carbono habría pasado a formar parte de la atmósfera venusiana debido a que el efecto de invernadero (debido a la presencia de todo el vapor de agua escapado hacia la periferia del planeta pero no susceptible de formar océanos) ya habría sido lo bastante importante en la atmósfera primitiva como para calentar lo suficiente la superficie del planeta. Mientras tanto, y a lo largo del dilatado período transcurrido, el agua original se habría ido perdiendo a través de otras reacciones, algunas de las cuales habrían dado lugar a las gotas de ácido sulfúrico descubiertas como uno de los constituyentes de las nubes de Venus.

Existen varias teorías acerca de cuál ha podido ser la evolución de la atmósfera venusiana. Si Venus poseía inicialmente vapor de agua que después fue disociado por la acción de las radiaciones solares ultravioletas, la mayor parte del hidrógeno así liberado debería haberse perdido en el espacio no sin dejar antes una traza en la atmósfera, consistente en una mayor proporción relativa del isótopo del hidrógeno más lento y más pesado llamado deuterio. Por otro lado, si en los comienzos no había agua en Venus, las trazas de su hidrógeno atmosférico deben de haber sido atrapadas por el viento solar (el cual contiene muy poco deuterio). Por eso, en principio, todo lo que se necesita es una muestra de la atmósfera de Venus para medir las proporciones de hidrógeno ligero y pesado; así se podría saber si el planeta siempre ha estado seco o si, por el contrario, en un comienzo se desarrolló igual que la Tierra, diferenciándose posteriormente debido a la proximidad al calor del Sol. Es aún difícil saber por qué dos planetas de tamaño parecido, formados en áreas muy próximas del Sistema Solar, tienen unas atmósferas tan diferentes. Es muy posible que la evolución de la atmósfera de Venus haya seguido un modelo parecido al que también pudo verse abocada nuestra propia atmósfera; por tal motivo, nuestros conocimientos acerca de la atmósfera terrestre aumentarán enormemente si conseguimos descubrir por qué fueron distintas las evoluciones de una y otra atmósferas.

La Luna también plantea un problema similar. Para los astrónomos y los físicos planetarios el estudio de la Luna es muy valioso debido precisamente a que no hay vida en ella; sin atmósfera y sin erosión, y con unas capas externas geológicamente inactivas, la Luna conserva en su superficie un registro de la historia antigua del Sistema Solar; los fragmentos

de roca recogidos durante las misiones espaciales del programa Apolo han ayudado a descifrar los sucesos ocurridos inmediatamente después de la formación de los planetas. La edad de los materiales que se encuentran en su superficie oscila entre 3.000 y 4.500 millones de años, y los meteoritos más viejos también se formaron hace unos 4.500 millones de años, hecho que concuerda con otras evidencias acerca de la edad de la Tierra y del Sistema Solar (véase el capítulo I). Pero si lo que se desea es investigar un planeta geofísicamente activo cuyos procesos puedan ser comparados con los que operan en la Tierra, debemos dirigirnos a Marte. En Marte se dan unas condiciones realmente extraordinarias para obtener información. Los datos que se poseen actualmente han sido proporcionados por sondas espaciales, de entre las cuales cabe destacar los vuelos orbitales del Mariner 9 que precedieron a los "amartizajes" de los Viking en 1976. La interpretación de las informaciones recibidas demuestra que en Marte se dan algunos tipos de actividad geológica (y quizás geofísica) similares a los que operan en la Tierra, por lo que es posible que en una época primitiva sus condiciones históricas debieron de ser parecidas a las que existieron en nuestro planeta en el momento en que surgió la vida.

El Mariner 9 entró en la órbita de Marte en 1971 y tras varios meses de trabajo se pudo confeccionar un mapa fotográfico completo del planeta. Este mapa demostró que el planeta estaba geológicamente activo y que poseía, entre otros elementos del relieve destacados, el mayor cráter volcánico del Sistema Solar, el Monte Olimpo, cuyo tamaño es mayor que el de todos los volcanes de la cadena hawaiana juntos y que se eleva veinticinco kilómetros por encima de las tierras circundantes (fig. 16). En Marte también existe un sistema de valles de rift tan grande como el sistema de valles del gran rift del este de África; en el sistema marciano se distinguen tanto fallas antiguas, cuyo trazado está realzado por la erosión, como fallas más jóvenes que prueban que la actividad geológica continúa en el planeta.

El hemisferio Norte de Marte está deprimido y su relieve

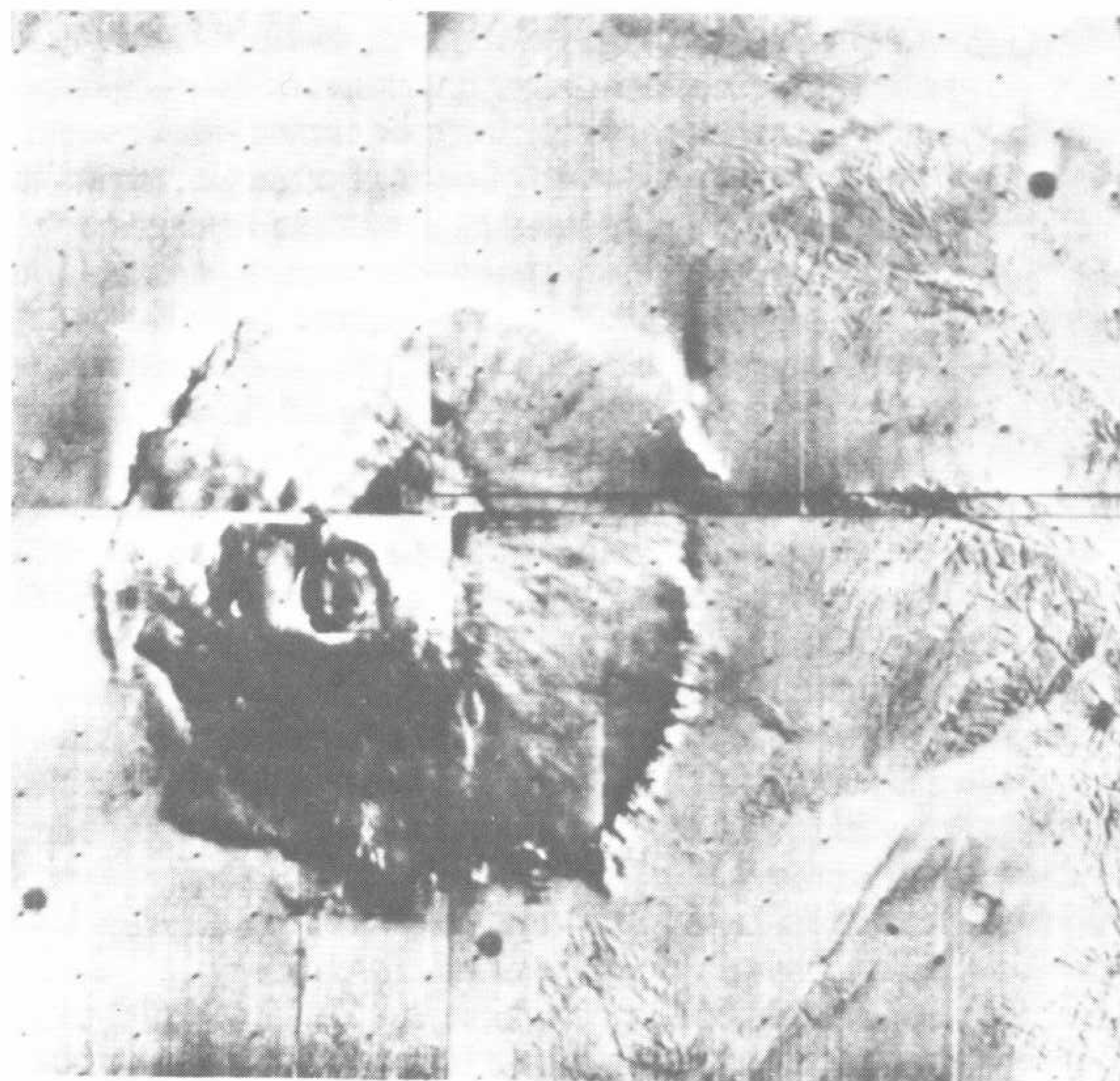


Fig. 16. El Monte Olimpo, el mayor volcán conocido del Sistema Solar (fotografía de la NASA).

es relativamente suave, pero el conjunto del planeta tiene forma de pera, debido a que el hemisferio Sur se levanta tres kilómetros por encima del radio medio; en este hemisferio, el relieve es más irregular y contiene un mayor número de cráteres (lo que implica una mayor antigüedad), y en él se incluyen los grandes volcanes situados en las regiones ecuatoriales. A grandes rasgos, esta diferenciación puede ser equivalente a las diferencias entre corteza continental y corteza oceánica en la Tierra; las llanuras del hemisferio Norte se habrían formado

a medida que las rocas ligeras fundidas procedentes del interior del planeta iban alcanzando la superficie, mientras que en el "continente" sureño el material ascendente alcanzaría la superficie a través de estructuras volcánicas. Por ahora, no se ha podido identificar los equivalentes de las dorsales expansivas ni los de las fosas oceánicas, y puede ser que ni tan siquiera existan. Pero incluso Harold Masursky, responsable del equipo de TV del Mariner 9 y científico del "U.S. Geological Survey's Center for Astrogeology", se ha preguntado «hasta qué punto la actual superficie de Marte se parece a la de la Tierra en el momento en que el Pangea (el supercontinente primitivo) se rompió por el efecto de la deriva continental»; además de una serie de preguntas como ¿por qué las tierras altas de Marte están concentradas en uno de sus hemisferios? ¿Se debe a la convección del manto? ¿Podemos aumentar nuestros conocimientos acerca de los episodios iniciales de la historia de la Tierra a través del estudio continuado de Marte?

Tal vez las extraordinarias dimensiones de algunos de los volcanes marcianos, especialmente el Monte Olimpo (*Olympus Mons*) y las cadenas montañosas *Tharsis* y *Elyseus*, se deban a que, a pesar de que el planeta continúa activo, no se dan en él los procesos de la deriva continental, ya que la corteza marciana es muy gruesa e impide este tipo de procesos. Si el Monte Olimpo es tan grande como toda la cadena hawaiana junta, y si dicha cadena se ha formado debido a la presencia de un punto caliente que ha ido abriendo agujeros sucesivos en la corteza a medida que ésta se iba desplazando, ¿no podría ser que toda la productividad de un punto caliente parecido existente en Marte se hubiese concentrado alrededor de un solo agujero? Para poder responder a preguntas como ésta, sería necesario enviar a Marte más sondas equipadas con instrumentos geofísicos más sofisticados que los de las sondas Viking; quizás incluso sea necesario enviar naves tripuladas a Marte. Sin embargo, la atmósfera y el clima marcianos ya pueden ser explicados bastante satisfactoriamente gracias a las informaciones aportadas por el Mariner 9 y a algunas teorizaciones inspiradas en el modelo terrestre.

Las fotografías del Mariner 9, al mismo tiempo que demuestran la existencia de una actividad geológica, revelan indicios de una erosión previa debida aparentemente a la acción de aguas en circulación. Es claramente visible la presencia de canales sinuosos excavados en la superficie de Marte y de una especie de deltas fluviales desecados, así como otros muchos signos de la circulación de un fluido de propiedades muy parecidas a las del agua. A pesar de que actualmente en Marte no existe agua libre en forma líquida, lo más sencillo es interpretar estos elementos del relieve como debidos a la circulación de unas masas acuosas que pudieron existir en el pasado bajo unas condiciones ligeramente diferentes de las actuales. La interpretación de un origen hídrico parece más factible que no la de la acción de otro tipo de fluido actualmente esfumado.

¿Qué tipo de cambio sería necesario para que el agua volviese a circular en Marte? Actualmente, la superficie del planeta es muy fría y la presión atmosférica es muy baja. Si se vertiera agua sobre Marte, ésta se congelaría o se evaporaría rápidamente; al igual que el dióxido de carbono no puede existir bajo forma líquida en la Tierra, tampoco el agua puede permanecer en estado líquido en Marte. Para que el agua se mantuviera en estado líquido en Marte serían necesarias presiones mucho más elevadas que las actuales —para detener la evaporación— y temperaturas asimismo más elevadas —para impedir la congelación del agua líquida. En efecto, un aumento de la presión o de la temperatura resolvería el problema, ya que cuando cambia una de ellas se mantiene la otra, debido al efecto invernadero.

Una de las maneras a través de las cuales podría aumentar la temperatura es el pronunciado bamboleo de Marte, aproximadamente cada 100.000 años los casquetes polares se inclinan hacia el Sol y, si esto provocase la liberación del dióxido de carbono congelado en ellos acumulado, se formaría una atmósfera más espesa y más caliente que recubriría todo el

* *New Science in the Solar System* (I.P.C. Magazines, Londres, 1975), p. 38.

planeta. El inconveniente de esta idea es que los ríos marcianos desecados tienen mucho más de 100.000 años de antigüedad (al menos tienen 500 millones de años de antigüedad, y quizás alcancen los 2.000 millones de años de edad). El tiempo que hace que Marte está seco ha sido calculado a partir del análisis de la distribución y el número de cráteres existentes en su superficie.

Estos cráteres, igual que los de Mercurio y de nuestra Luna (y que los de Venus y la Tierra), se han formado debido al impacto de meteoritos sobre la superficie del planeta, especialmente durante los estadios iniciales de desarrollo del Sistema Solar. Los cráteres más grandes son los más antiguos, ya que se formaron cuando en el Sistema Solar aún existían grandes fragmentos rocosos que no habían sido incorporados a los procesos de formación de planetas. Y a pesar de que muchos de los grandes cráteres presentan indicios de erosión (que indican que el agua circuló después de que se formasen), los cráteres más pequeños y más jóvenes tienen unos bordes muy angulosos. En Marte hay un gran número de cráteres superpuestos a los sistemas fluviales; pero hay que tener en cuenta que un río no deja de ser un pequeño elemento del relieve y que el número de meteoritos que golpean la superficie de Marte en un millón de años no es muy elevado, por tanto los ríos han tenido que formarse con una antelación suficiente como para permitir que se dejasen sentir sobre ellos los efectos del bombardeo procedente del espacio.

Por tal motivo, la inundación de Marte debió de ser un suceso de corta duración ocurrido cuando el planeta aún era muy joven. Éste es el elemento clave que ha permitido a algunos científicos como James Pollack, del "Ames Research Center", elaborar lo que parece ser el modelo definitivo acerca de cómo se formó en Marte (para desaparecer posteriormente) una atmósfera cálida, húmeda y espesa. Las evidencias de la actividad geológica en Marte proporcionan el último elemento que este modelo necesita: la desgasificación de los materiales en los primeros momentos de la vida del planeta; esta desgasificación provocaría la formación de una atmósfera inicial muy parecida a la atmósfera primitiva de la Tierra, es decir, una atmósfera reductora rica en metano y amoniaco y, paradójicamente, bastante tóxica para las formas de vida superiores que hoy pueblan la Tierra.

Admitiendo que este tipo de atmósfera espesa y reductora se hubiese formado en Marte, su evolución habría sido distinta a la de la atmósfera de la Tierra debido a que la poca intensidad del campo gravitatorio de Marte habría permitido que muchos átomos y algunas moléculas escapasen hacia el espacio interplanetario. Los gases más ligeros —especialmente el hidrógeno— habrían escapado rápidamente de la exosfera marciana aun suponiendo que existieran temperaturas que nosotros consideramos agradables. Por eso, aunque un fuerte efecto de invernadero inicial mantuviese cálido al planeta, este mismo calor favorecería el adelgazamiento de la atmósfera. Cuando los canales fluviales y las restantes formas erosivas de origen hídrico ya existían, el planeta sufrió un fuerte enfriamiento que produjo la congelación del agua en los casquetes polares y en el subsuelo; paralelamente, la atmósfera se iba adelgazando cada vez más. Con la eliminación del vapor de agua de la atmósfera, el hidrógeno escapó hacia el espacio y otros compuestos se combinaron con las rocas superficiales; la combinación de todos estos elementos daría lugar a la tenue atmósfera de dióxido de carbono que existe hoy en Marte. Pero suponiendo que las condiciones cálidas y húmedas hubiesen persistido durante un tiempo lo suficientemente largo como para permitir el desarrollo de las primeras formas de vida de la cadena evolutiva, ¿podrían haberse adaptado estas formas de vida a las nuevas y más difíciles condiciones? ¿Podrían haber sobrevivido sus descendientes hasta nuestros días?

La respuesta podría ser afirmativa. La cantidad de agua almacenada en los casquetes polares marcianos bastaría probablemente para cubrir todo el planeta bajo diez metros de agua, y además también debe de haber muchísima agua en la capa situada debajo de la superficie del planeta. Algunas plantas terrestres muy resistentes, como los líquenes, pueden

sobrevivir en ambientes extremadamente duros, incluyendo los valles secos de la Antártida; quizás, si pudiesen ser trasplantadas, algunas de estas plantas sobrevivirían en Marte. Por lo que concierne a la capacidad de adaptarse y de evolucionar en una atmósfera cambiante, en muchos sentidos las transformaciones producidas en la atmósfera terrestre han sido incluso mayores que las ocurridas en Marte. Y a pesar de que el oxígeno es esencial para cualquier forma de vida en la Tierra, es perfectamente factible que alguna otra forma de vida, procedente del exterior del Sistema Solar, la considere una atmósfera corrosiva e imposible para la supervivencia.

La gran ventaja del oxígeno para los seres vivos que se han adaptado a él es que reacciona tan enérgicamente con otros productos químicos que constituye una fuente de energía extraordinaria para la vida. Las plantas necesitan menos energía que los animales como el hombre y son capaces de adaptarse a ambientes más hostiles; por ello no existen árboles muy activos o líquenes energéticos, ya que ambas formas de vida han optado por un sistema menos peligroso para obtener la energía que necesitan. En 1975, muchos planetólogos estaban convencidos de que la vida podía haber empezado en Marte exactamente de la misma manera como empezó en la Tierra y no encontraban ninguna razón plausible por la cual no podría hallarse en ese planeta alguna forma de vida.

Las primeras imágenes de la superficie marciana obtenidas de cerca por los Viking difícilmente pueden ser representativas de un planeta tan grande como éste, pero han servido para que los científicos planetarios siguieran estudiando la formación de Marte. Las fotografías hechas durante los vuelos orbitales de los Viking confirmaron la visión general que se tenía de Marte como un planeta activo que en otros tiempos estuvo cubierto por masas de agua en circulación (al menos en las latitudes medias).

Los primeros resultados de los experimentos efectuados a bordo de la cápsula revelaron que en el suelo marciano existía un componente muy activo. La incubación en el interior de la cápsula de una muestra de suelo humedecido en una atmósfera parecida a la de la Tierra liberó una cantidad de oxígeno sorprendentemente alta (incluso mayor de la que liberan los suelos de los desiertos terrestres tratados de la misma manera). Esto produjo, a finales del mes de julio de 1976, una gran expectación, y algunos científicos llegaron a la conclusión de que este oxígeno sólo podían producirlo organismos vivientes. Más adelante, la adición de trazadores radiactivos a las muestras, efectuada en el mismo interior del laboratorio automático del Viking, reveló la formación de dióxido de carbono, la cual se prolongó durante unas setenta horas. Si se hubiese formado a través de una reacción química, la producción de dióxido de carbono sólo se habría prolongado durante unos minutos; por otro lado, cualquier proceso biológico debería haber continuado al menos durante una docena de días. Este hecho, lo único que confirma es que, en relación con los estándares terrestres, en el suelo marciano hay algo especial. Así pues, por el momento no existen evidencias directas de vida en Marte.

La presencia de grandes cantidades de oxígeno atrapado químicamente en el suelo marciano es, por supuesto, intrigante, sobre todo si se considera la posibilidad de que algún día pueda formarse una capa espesa y cálida de aire sobre la superficie del Planeta Rojo. La eventual existencia de un nuevo tipo de proceso situado a mitad de camino entre la biología y la química ha llamado la atención de muchos científicos pertenecientes a disciplinas diversas; también la posibilidad de investigar durante un largo período el clima y los vientos marcianos nos permitirá mejorar nuestros conocimientos acerca de la atmósfera, la meteorología y el clima planetarios. El éxito global de las misiones Viking animó a las grandes potencias espaciales a enviar misiones de exploración (en parte fracasadas, como la soviética Fobos) con vistas a preparar el terreno para enviar, en las primeras décadas del siglo que viene, una misión tripulada, seguramente de carácter internacional, camino del Planeta Rojo.

Posiblemente, Marte continuará siendo el centro de atención de los geofísicos planetarios durante varios años. Pero

también revisten gran interés el gigante gaseoso Júpiter o cualquiera de los otros planetas terrestres. Júpiter es mayor que todos los otros planetas juntos y su atmósfera reúne las características reductoras bajo las cuales se cree que se inició la vida en la Tierra; además, se mantiene caliente porque aún está irradiando el calor procedente de la formación del planeta. El calor, el metano y el amoniaco, y (al menos en la parte superior de su atmósfera) las radiaciones ultravioletas constituyen las condiciones ideales para la formación de vida; la densa atmósfera de Júpiter sería el equivalente de los océanos terrestres. Quizá la falta de tierras emergidas sea la causa de que no puedan desarrollarse formas de vida inteligentes, de la misma manera que la vida inteligente no se desarrolló en los océanos terrestres. Un gran inconveniente para el desarrollo de formas de vida superiores en Júpiter es la escasa cantidad de radiación solar que recibe, cinco veces menor de la que llega a la Tierra. Pero aún hay suficiente margen para que los amantes de la ciencia-ficción especulen, tal vez no sin razón, acerca de posibles formas de vida que flotan en las nubes de Júpiter igual que las medusas en nuestros mares.

En Júpiter todo posee un enorme tamaño. La famosa Gran Mancha Roja podría tragarse la Tierra entera; pero ésta no es la mayor forma del planeta, por lo que no es descabellado pensar que el planeta pueda poseer una magnetosfera gigante y un intenso campo magnético, los cuales podrían ser tan sorprendentes como lo son los de la Tierra en algunos sentidos. Desde una sonda espacial equipada únicamente con detectores magnéticos y un radiotelescopio, la Tierra y Júpiter darían la impresión de ser los planetas más parecidos dentro del Sistema Solar, y los únicos que valdría la pena investigar en detalle. La primera sonda que visitó Júpiter, la Pioneer 10, estaba equipada, entre otros instrumentos, con detectores capaces de medir las características de su magnetosfera al igual que lo hizo su sucesora, la Pioneer 11.

Cuando cruzó la onda de choque (véase la figura 17), el Pioneer 10 estaba a una distancia de 108 radios de Júpiter respecto a la superficie del planeta; a los 96 radios, la sonda

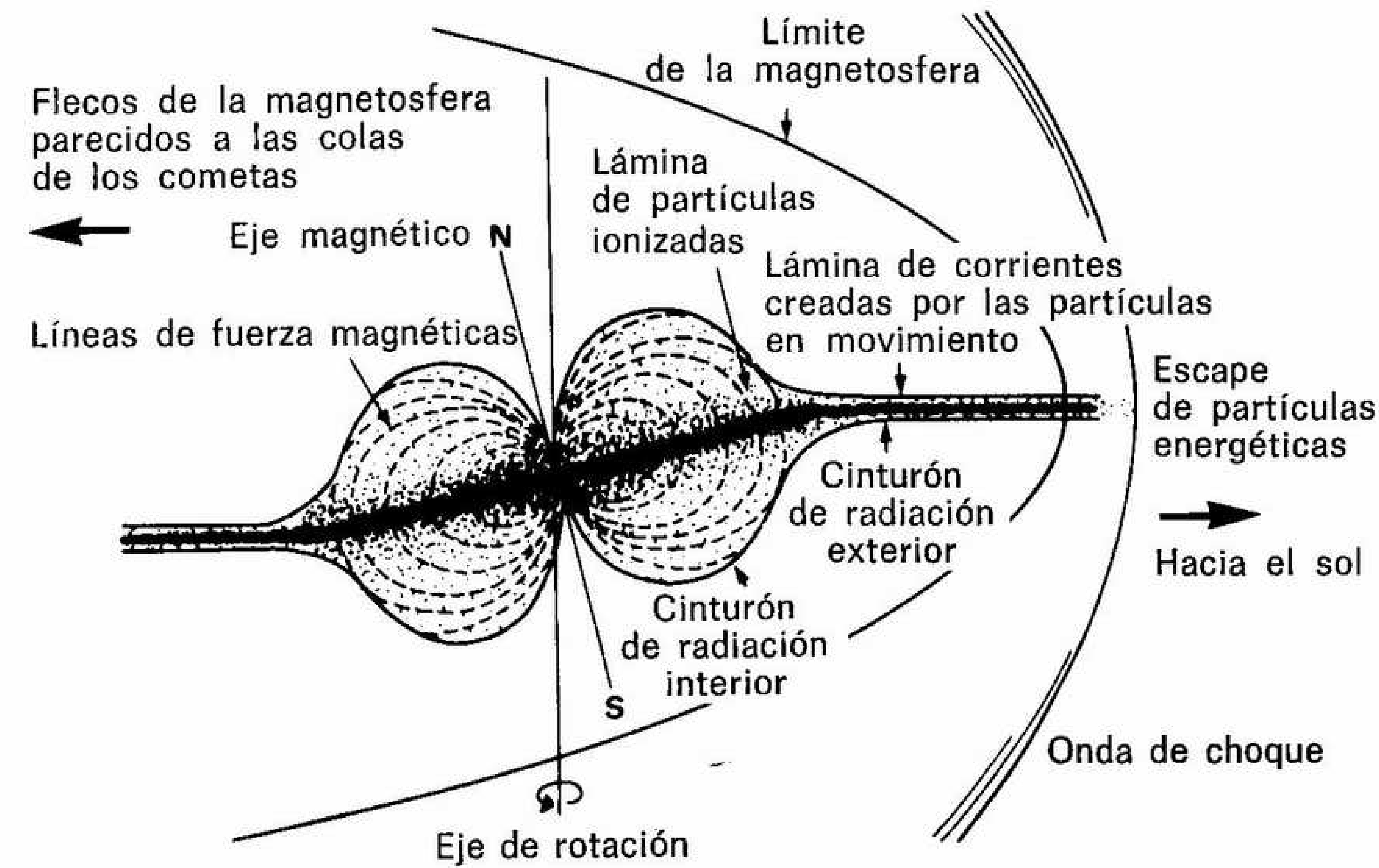


Fig. 17. La magnetosfera de Júpiter, en la que se observan las regiones exteriores distorsionadas y la región dipolar; la escala del dibujo no permite la representación de la región interior de campos más complejos. (De *New Science in the Solar System*; I.P.C. Magazines, Londres, 1975.)

cruzó la magnetopausa y entró en la magnetosfera. La magnetosfera de la Tierra sólo se extiende hasta una distancia equivalente a 13 radios terrestres (algo más que el radio del planeta Júpiter), pero el campo magnético de Júpiter da la impresión de ser muy parecido al terrestre, excepto por su intensidad (en sus regiones centrales) en función de la distancia respecto al planeta. A diferencia de la magnetosfera terrestre, las regiones exteriores de la magnetosfera de Júpiter son muy "esponjosas", con la magnetopausa situada entre 50 y 100 radios planetarios según varíe el viento solar. Más allá de los 20 radios, las partículas energéticas salientes de los cinturones de radiación distorsionan el campo magnético. Entre 20 y 3 radios, el campo es dipolar y muy parecido al de la Tierra, pero es ocho veces más intenso. Y dentro de la distancia equi-

valente a los tres radios, el campo está dominado por otra componente, por un campo cuatripolar u octopolar más complejo cuya zona de influencia es muy pequeña porque con la distancia se atenúa mucho más rápidamente que el campo dipolar. Se dice que el campo magnético de Júpiter se diferencia del de la Tierra en ciertos aspectos debido a la existencia de esta complicada estructura de corto alcance sobreimpuesta al campo dipolar (fig. 17).

Parece muy probable que el magnetismo esté producido por la existencia de corrientes en el núcleo metálico líquido del planeta, y las complicaciones pueden estar provocadas por la existencia de otras interferencias en la circulación en el núcleo. Los esfuerzos investigadores para conocer con mayor detalle la estructura del campo magnético de Júpiter son de gran importancia porque permiten conocer al mismo tiempo qué es lo que sucede en el interior del planeta. Y puesto que se piensa que el núcleo metálico líquido del planeta gigante está constituido por hidrógeno (en un estado que no puede existir en la Tierra debido a las grandes presiones necesarias para convertir al hidrógeno en líquido), estas observaciones interesan también enormemente no sólo a los científicos planetarios sino incluso a los físicos, quienes pueden así determinar el comportamiento del hidrógeno sometido a unas presiones tan elevadas. Pero la realización de todas estas observaciones está dificultada por el efecto perturbador de las cuatro lunas interiores de Júpiter, llamadas Amaltea, Io, Europa y Ganímedes. Estos satélites orbitan en el plano ecuatorial dentro de la magnetosfera, mientras que nuestra Luna se encuentra muy alejada de la magnetosfera terrestre; parece que esto ha proporcionado, al menos a Io, una tenue atmósfera que está perdiendo gases continuamente debido a la escasa fuerza atractiva del satélite; no obstante, estas pérdidas estarían compensadas por la inyección constante de partículas de la magnetosfera.

Todo esto puede parecer quizá demasiado inconexo como para relacionarlo con la geofísica y las modernas ciencias de la Tierra en cuanto a su aplicación para racionalizar el consumo de los recursos de la Tierra. Pero muy pocos de los beneficios que la humanidad debe a la ciencia han llegado a través de investigaciones esencialmente prácticas de problemas específicos; prácticamente toda la investigación fundamental está impulsada por la curiosidad humana, y sólo "a posteriori" se le encuentra una aplicación práctica. Si algún día el hombre deja de interesarse por lo que ocurre en el Universo, probablemente será debido a que la raza humana habrá desaparecido. Pero enfrentada como está la Tierra a problemas tan graves como la superpoblación y la escasez de alimentos y materias primas, es lícito preguntarse cuáles son los beneficios prácticos que están aportando este tipo de investigaciones acerca del Sistema Solar. Además de la enumeración de la gran cantidad de dispositivos, técnicas, nuevos materiales, etc. que la carrera del espacio ha puesto a nuestra disposición, es ya un tópico decir que la mayor aportación que la humanidad debe al proyecto lunar Apolo es el haberla ayudado a darse cuenta del concepto de "astronave terrestre", con unos recursos limitados y una población todavía demasiado fértil. Pero los viajes espaciales no significan en absoluto que el colectivo humano haya puesto un pie en el espacio. Incluso sin salir de nuestro Sistema Solar hemos encontrado en Júpiter un planeta tan grande que nuestra Tierra podría desaparecer engullida por el equivalente joviano de un gran huracán tropical. En el capítulo I vimos la insignificancia de nuestro Sistema Solar dentro del Universo, y la pequeñez de nuestra civilización comparada con la historia del planeta. De cara a hacer un buen uso de los nuevos conocimientos acerca de la Tierra en movimiento necesitamos, no sólo la información y las técnicas de que ya disponemos, sino que el colectivo humano aprenda a hacer algo constructivo con ellas. En términos científicos y técnicos, los problemas pueden ser resueltos, pero, ¿existe la capacidad política para emprender las acciones necesarias? Eso depende de todos nosotros.

BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **Stephen Hawking.** *Una vida para la ciencia.* Michael White y John Gribbin
2. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig
3. **La explosión demográfica.** *El principal problema ecológico.* Paul R. Ehrlich y Anne H. Ehrlich
4. **El monstruo subatómico.** *Una exploración de los misterios del Universo.* Isaac Asimov
5. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
6. **La evolución de la física.** Albert Einstein y Leopold Infeld
7. **El secreto del Universo.** *Y otros ensayos científicos.* Isaac Asimov
8. **Qué es la vida.** Joël de Rosnay
9. **Los tres primeros minutos del Universo.** Steven Weinberg
10. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
11. **El hombre mecánico.** *El futuro de la robótica y la inteligencia humana.* Hans Moravec
12. **La superconductividad.** *Historia y leyendas.* Sven Ortoli y Jean Klein
13. **Introducción a la ecología.** *De la biosfera a la antroposfera.* Josep Peñuelas
14. **Miscelánea matemática.** Martin Gardner
15. **El Universo desbocado.** *Del Big Bang a la catástrofe final.* Paul Davies
16. **Biotecnología.** *Una nueva revolución industrial.* Steve Prentis
17. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
18. **A través de la ventana.** *Treinta años estudiando a los chimpancés.* Jane Goodall
19. **Einstein.** Banesh Hoffmann
20. **La doble hélice.** *Un relato autobiográfico sobre el descubrimiento del ADN.* James Watson
21. **Cien mil millones de soles.** *Estructura y evolución de las estrellas.* Rudolf Kippenhahn
22. **El planeta viviente.** *La adaptación de las especies a su medio.* David Attenborough
23. **Evolución humana.** Roger Lewin
24. **El divorcio entre las gaviotas.** *Lo que nos enseña el comportamiento de los animales.* William Jordan

25. **Lorenz.** Alec Nisbett
26. **Mensajeros del paraíso.** *Las endorfinas, drogas naturales del cerebro.* Charles F. Levinthal
27. **El Sol brilla luminoso.** Isaac Asimov
28. **Ecología humana.** *La posición del hombre en la naturaleza.* Bernard Campbell
29. **Sol, lunas y planetas.** Erhard Keppler
30. **Los secretos de una casa.** *El mundo oculto del hogar.* David Bodanis
31. **La cuarta dimensión.** *Hacia una geometría más real.* Rudy Rucker
32. **El segundo planeta.** *El problema del aumento de la población mundial.* U. Colombo y G. Turani
33. **La mente (I).** Anthony Smith
34. **La mente (II).** Anthony Smith
35. **Introducción a la química.** Hazel Rossotti
36. **El envejecimiento.** David P. Barash
37. **Edison.** Fritz Vögtle
38. **La inestable Tierra.** *Pasado, presente y futuro de las catástrofes naturales.* Basil Booth y Frank Fitch
39. **Gorilas en la niebla.** *13 años viviendo entre los gorilas.* Dian Fossey
40. **El espejo turbulento.** *Los enigmas del caos y el orden.* John Briggs y F. David Peat
41. **El momento de la creación.** *Del Big Bang hasta el Universo actual.* James S. Trefil
42. **Dios y la nueva física.** Paul Davies
43. **Evolución.** *Teorías sobre la evolución de las especies.* Wolfgang Schwoerbel
44. **La enfermedad, hoy.** Lluís Daufí
45. **Iniciación a la meteorología.** Mariano Medina
46. **Los niños de Urania.** *En busca de las civilizaciones extraterrestres.* Evry Schatzman
47. **Amor y odio.** *Historia natural del comportamiento humano.* Irenäus Eibl-Eibesfeldt
48. **Matemáticas e imaginación (I).** Edward Kasner y James Newman
49. **Matemáticas e imaginación (II).** Edward Kasner y James Newman
50. **Darwinismo y asuntos humanos.** Richard Alexander
51. **La explosión de la relatividad.** Martin Gardner
52. **Las plantas.** *Amores y civilizaciones vegetales.* Jean-Marie Pelt
53. **La Tierra en movimiento.** John Gribbin









La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis, En busca de la doble hélice, En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

La Tierra en movimiento
J. Gribbin
53





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca Científica Salvat



La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis*, *En busca de la doble hélice*, *En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

La Tierra en movimiento
J. Gribbin
53





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca
Científica
Salvat



La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis, En busca de la doble hélice, En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

La Tierra en movimiento

J. Gribbin

53





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca
Científica
Salvat

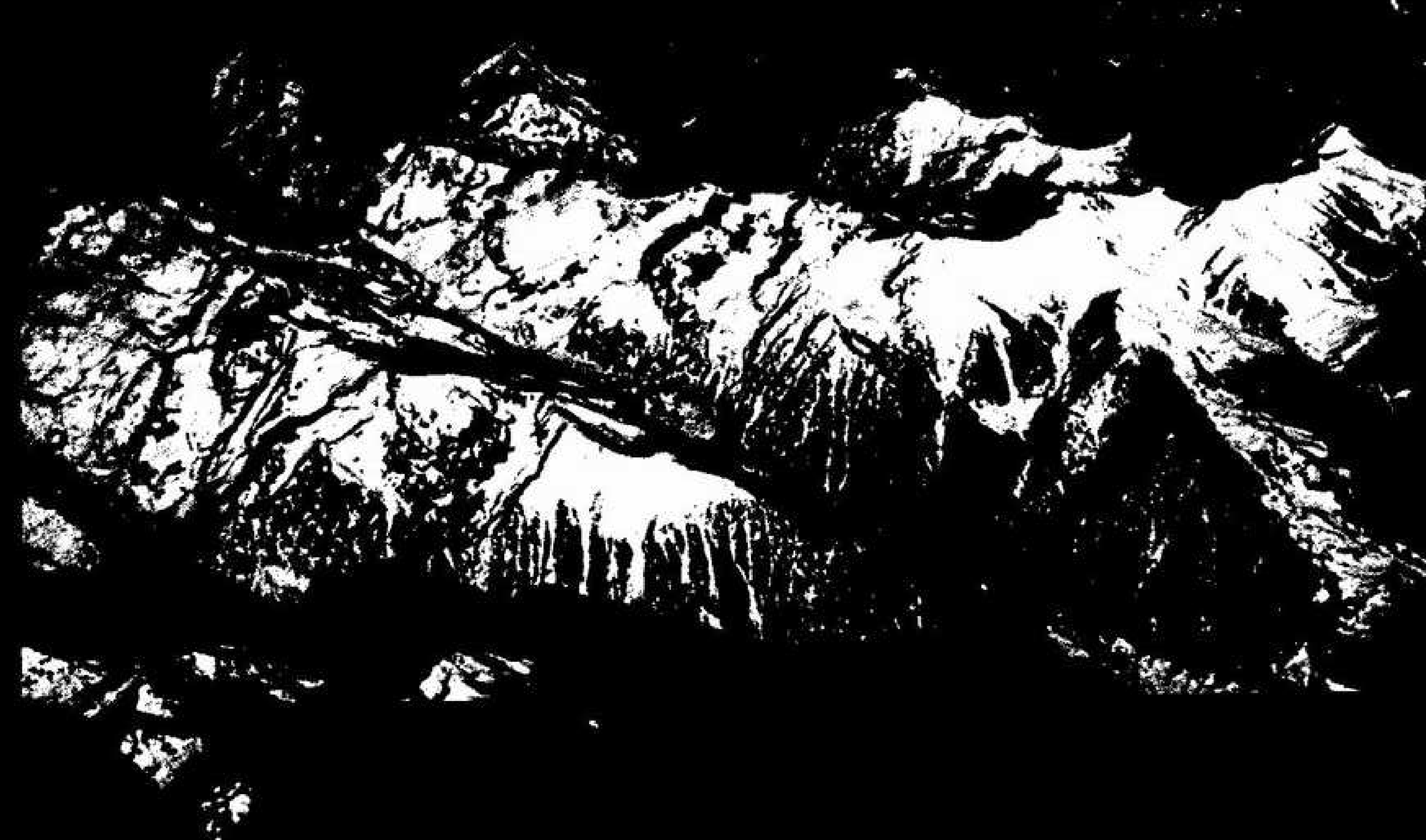


La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis*, *En busca de la doble hélice*, *En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

La Tierra en movimiento





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca Científica Salvat



La teoría de la deriva de los continentes, ridiculizada por los principales geólogos cuando fue propuesta por primera vez en 1912 por Alfred Wegener, ha llegado a ser uno de los conceptos científicos más importantes en el presente.
La Tierra en movimiento constituye una interesante introducción a la geología a la vez que explica la importancia de la teoría de la tectónica de placas y sus consecuencias. Gracias a ella sabemos, por ejemplo, que los continentes se desplazan lentamente por la Tierra sobre placas y que en sus fricciones y colisiones dan origen a cordilleras y provocan terremotos.
Además, esta nueva comprensión de la dinámica de la Tierra y de las diferencias existentes con otros planetas del Sistema Solar nos puede conducir a pensar en nuestro Planeta como una enorme "Nave Espacial", pero con recursos limitados que han de ser utilizados y valorados convenientemente.

John Gribbin se doctoró en astrofísica en la Universidad de Cambridge, trabajó cinco años como redactor de la revista *Nature* y fue responsable de la sección diaria "Science report" de *The Times*. Ha escrito muchos libros entre los que destacan *Génesis, En busca de la doble hélice, En busca del gato de Schrödinger* y *El clima futuro*, todos en la colección Biblioteca Científica Salvat.

en movimiento





La Tierra en movimiento

John Gribbin

Biblioteca Científica Salvat